



**You have downloaded a document from  
RE-BUS  
repository of the University of Silesia in Katowice**

**Title:** Krystalooptyka

**Author:** Włodzimierz Łapot

**Citation style:** Łapot Włodzimierz. (1995). Krystalooptyka. Katowice :  
Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego



Uznanie autorstwa - Użycie niekomercyjne - Bez utworów zależnych Polska - Licencja  
ta zezwala na rozpowszechnianie, przedstawianie i wykonywanie utworu jedynie w celach  
niekomercyjnych oraz pod warunkiem zachowania go w oryginalnej postaci  
(nie tworzenia utworów zależnych).



UNIWERSYTET ŚLĄSKI  
W KATOWICACH



Biblioteka  
Uniwersytetu Śląskiego



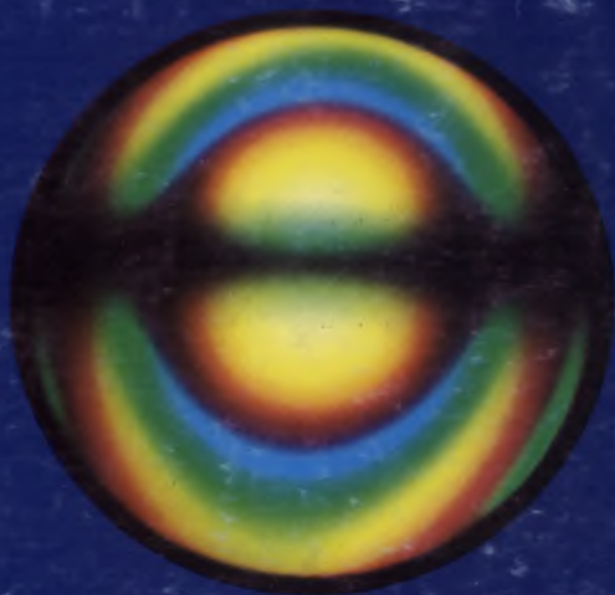
Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego

ISSN 0239-6432

Skrypty Uniwersytetu Śląskiego nr 500

Włodzimierz Łapot

# Krystalooptyka



Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego



Katowice 1995



Skrypty Uniwersytetu Śląskiego nr 500

Włodzimierz Łapot

# Krystalooptyka

Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego



Katowice 1995



**Redaktor serii: Nauki o Ziemi**  
**ANDRZEJ T. JANKOWSKI**

**Recenzenci**  
**ANTONI NOWAKOWSKI**  
**WITOLD ŻABIŃSKI**

# Treść

1. Wstęp . . . . .	5
2. Fale elektromagnetyczne . . . . .	7
3. Współczynnik załamania światła . . . . .	12
4. Światło i granica środowisk optycznych . . . . .	15
5. Polaryzacja światła . . . . .	19
6. Podwójne załamanie światła . . . . .	21
7. Podział kryształów na grupy optyczne . . . . .	25
8. Obrazowanie właściwości optycznych kryształów . . . . .	26
9. Symetria optyczna i geometryczna kryształów . . . . .	39
10. Współczynnik załamania światła i struktura kryształów . . . . .	47
11. Dyspersja światła w kryształach . . . . .	50
12. Kryształy optycznie aktywne . . . . .	55
13. Anomalie optyczne . . . . .	58
14. Reakcje fotochemiczne w kryształach . . . . .	62
15. Luminescencja kryształów . . . . .	65
16. Barwa kryształów . . . . .	68
17. Odbicie światła przez kryształy . . . . .	70
18. Kryształy pod mikroskopem polaryzacyjnym . . . . .	74
18.1. Preparaty mikroskopowe . . . . .	74
18.2. Otrzymywanie światła spolaryzowanego . . . . .	76
18.3. Mikroskopy polaryzacyjne (petrograficzny, kruszcowy, uniwersalny) . . . . .	79
18.3.1. Obsługa mikroskopu polaryzacyjnego . . . . .	85
18.4. Droga światła w mikroskopie polaryzacyjnym . . . . .	89

18.5. Badania w świetle spolaryzowanym przechodzącym, równoległym (badania ortoskopowe) . . . . .	94
18.5.1. Oznaczanie współczynnika załamania światła . . . . .	94
18.5.1.1. Metoda F. Beckego . . . . .	95
18.5.1.2. Metoda reliefu . . . . .	100
18.5.1.3. Metoda „jaszczurowatej powierzchni” . . . . .	102
18.5.1.4. Metoda imersyjna . . . . .	103
18.5.1.5. Metoda skośnego oświetlenia . . . . .	104
18.5.1.6. Metoda de Chaulnesa . . . . .	105
18.5.2. Wygaszanie światła przez kryształy i pomiar kąta wygaszania . . . . .	106
18.5.3. Pleochroizm (polichroizm, wielobarwność) . . . . .	112
18.5.4. Barwy interferencyjne . . . . .	116
18.5.5. Określanie dwójłomności przekroju kryształu . . . . .	124
18.5.6. Pomiar grubości preparatu mikroskopowego . . . . .	125
18.5.7. Płytki pomocnicze i ich zastosowanie . . . . .	127
18.6. Badania w świetle spolaryzowanym przechodzącym, zbieżnym (badania konoskopowe) . . . . .	135
18.6.1. Odróżnianie kryształów jedno- i dwuosiowych . . . . .	137
18.6.2. Określanie znaku optycznego kryształów . . . . .	145
18.6.3. Pomiar kąta osi optycznych . . . . .	150
18.6.4. Badanie skręcenia płaszczyzny polaryzacji . . . . .	151
18.6.5. Określanie dyspersji dwójłomności i kąta osi optycznych . . . . .	153
18.7. Badania w świetle spolaryzowanym odbitym . . . . .	154
18.7.1. Mikroskopowa ocena twardości kryształu (minerału) . . . . .	154
18.7.2. Badania z użyciem wiązki światła równoległego . . . . .	156
18.7.3. Badania z użyciem wiązki światła zbieżnego . . . . .	158
18.8. Tok oznaczeń mikroskopowych . . . . .	159
19. Wyspecjalizowane metody badań optycznych kryształów . . . . .	165
19.1. Stolik uniwersalny . . . . .	165
19.2. Mikroskopia fluorescencyjna . . . . .	168
19.3. Mikroskopia fazowo-kontrastowa . . . . .	168
19.4. Inne metody . . . . .	170
20. Literatura zalecana . . . . .	173
Źródła ilustracji . . . . .	175

## Wstęp

Skrypt jest przeznaczony dla studentów geologii specjalizujących się w mineralogii i petrologii, pragnących zapoznać się gruntownie z mikroskopowymi metodami rozpoznawania minerałów i skał. Może on być także wielce przydatny dla gemmologów, chemików, biologów, ekologów itp.

U podstaw inicjatywy wydawniczej legło wyczerpanie podręcznika T. Penkali *Optyka kryształów* (1965) oraz potrzeba aktualizacji informacji wynikająca z postępu wiedzy w minionym okresie.

Z przyczyn formalnych materiał zawarty w skrypcie wykracza tylko nieznacznie poza uniwersytecki program dydaktyczny. Został on tak dobrany, by stanowił kompendium informacji z zakresu klasycznej optyki kryształów, niezbędnych dla świadomego użytkowania mikroskopowych metod rozpoznawania minerałów i skał. Temu celowi podporządkowano układ skryptu oraz dobór materiału ilustracyjnego. Pod tym kątem dokonywano także niezbędnych uproszczeń i wyboru omawianych zagadnień, których głębsza analiza przekraczałaby formalne ramy skryptu. Czytelnicy zainteresowani wnikliwszym studiowaniem pewnych zagadnień znajdą jednak odsyłacze do oryginalnej literatury. W rezultacie w stosunkowo niewielkiej objętości skryptu starano się pomieścić niezbędny w mikroskopowaniu zasób informacji. Ich pełne wykorzystanie może stanowić także podstawę dla pogłębiania wiedzy z mineralogii optycznej.

Niniejszy skrypt uświadamia jednocześnie coraz dotkliwszy brak podręcznika akademickiego z zakresu mineralogii optycznej na polskim rynku wydawniczym.

\* \* \*

Już od dawna wiadano, że światło:

- rozchodzi się prostolinijnie w środowisku jednorodnym (Euklides, III w. p.n.e.),
- odbija się od powierzchni, zwłaszcza lustrzanych (Euklides, III w. p.n.e.),
- załamuje się na granicy środowisk przezroczystych (np. wody i powietrza; Arystoteles, 350 r. p.n.e.; Ptolemeusz, 120 r. p.n.e.),
- pochodząc z różnych źródeł, nie wpływa na siebie, gdy krzyżuje się w przestrzeni.

Pierwsze próby wyjaśnienia istoty i natury światła opierały się na dwu teoriach (XVII w.):

- teorii korpuskularnej I. Newtona (1643—1727), w myśl której światło miałyby stanowić strumień cząstek materialnych podlegających prawom mechaniki,
- teorii falowej Ch. Huyghensa (1629—1695), według której światło byłoby ciągiem fal sprężystych.

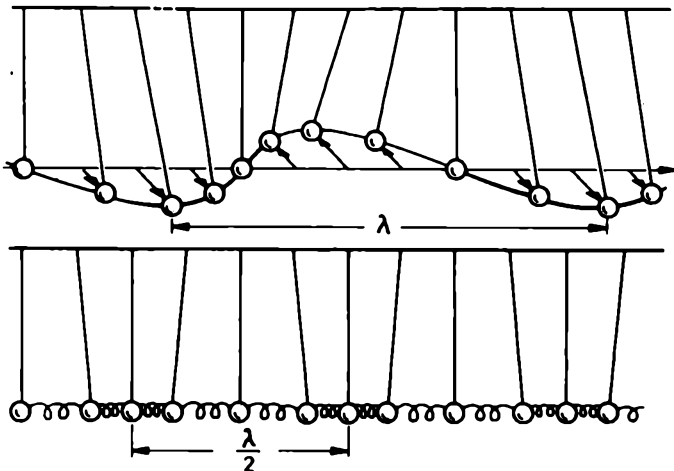
Następne wieki to okres ścierania się zwolenników i przeciwników falowej i korpuskularnej teorii światła. Do zrozumienia istoty światła wielki wkład wnieśli: Ch. Huyghens (*Traktat o świetle*, 1690 rok), L. Euler (*Nowa teoria światła i barw*, 1746 rok), A. J. Fresnel (1788—1827), D. F. Arago (1786—1853), Th. Joung (1773—1829), J. C. Maxwell (1831—1879), H. A. Lorentz (1853—1928).

Przełom XIX i XX wieku to okres ujednolicania opisu matematycznego zjawisk na pozór sprzecznych: falowych i korpuskularnych. W 1900 roku M. Planck (1858—1947) przyjął rewolucjonizujące fizykę założenie, że w zjawisku emisji i absorpcji światła energia zmienia się skokowo — porcjami (kwantami). W 1905 roku A. Einstein (1879—1955) założył, że samo światło stanowi strumień cząstek — fotonów. L. de Broglie w 1924 roku z kolei wprowadził pojęcie „fal materii” i stwierdził, że z ruchem korpuskuł o masie  $m$  i o prędkości  $c$  są skojarzone fale o określonej długości  $\lambda$ . Ostatecznie, niesprzeczną teorię światła dała elektrodynamika kwantowa, której podstawy stworzyli około 1929 roku P. A. M. Dirac, W. Heisenberg i W. Pauli.

Do objaśnienia zjawisk optycznych zachodzących w kryształach posługujemy się teorią falową, której wykładnię dał J. C. Maxwell (1831—1879).

## Fale elektromagnetyczne

Fala jest to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie, przenoszące energię bez przenoszenia materii. Fale, w których drgania odbywają się w kierunku zgodnym z kierunkiem rozprzestrzeniania, są falami podłużnymi. Fale, w których drgania odbywają się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali, są falami poprzecznymi (rys. 1).



Rys. 1. Fale poprzeczna (u góry) i podłużna (u dołu) rozchodzące się wzdłuż połączonych wahadeł

Fale elektromagnetyczne należą do fal poprzecznych. Są to rozchodzące się w ośrodku materialnym lub w próżni zaburzenia pola elektromagnetycznego, wywołane zmianami rozkładu ładunków elektrycznych (rys. 2). Prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w ośrodku materialnym wynosi:

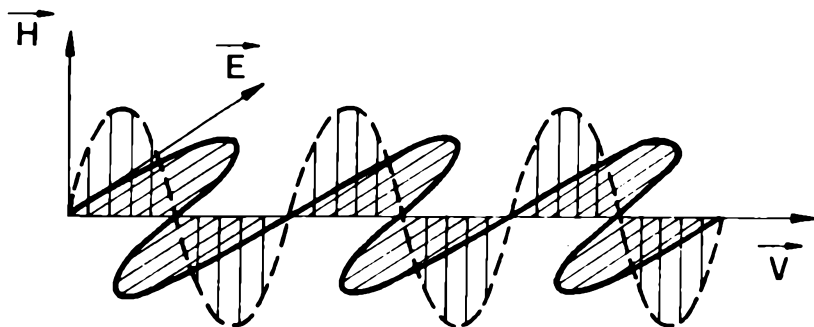
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

gdzie:

$c = 2,9982 \times 10^8$  m/s, tj. około 300 000 km/s, tzw. prędkość światła w próżni,

$\epsilon$  — przenikalność elektryczna (stała dielektryczna),

$\mu$  — przenikalność magnetyczna.



Rys. 2. Fala elektromagnetyczna. Zmiana w czasie wektorów natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$  i magnetycznego  $\vec{H}$

Rozchodzeniu się fali elektromagnetycznej towarzyszy przenoszenie energii elektromagnetycznej. W ośrodku jednorodnym kierunek rozchodzenia się fali elektromagnetycznej jest prostopadły do wektorów natężenia pola elektrycznego ( $\vec{E}$ ) i magnetycznego ( $\vec{H}$ ). Wektory te są do siebie prostopadłe, a ich zmiany w czasie są identyczne (zgodne w fazie, rys. 2). Najprostszym przypadkiem fali elektromagnetycznej jest fala o sinusoidalnej zależności wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego od czasu (fala monochromatyczna), wywołana na przykład harmonicznym drganiem ładunku elektrycznego stanowiącym źródło. Fale o innej zmienności można rozpatrywać jako zbiory fal monochromatycznych (harmonicznych). Długością fali harmonicznej nazywa się odległość  $\lambda$  pomiędzy dwoma najbliższymi punktami ośrodka drgającymi w tej samej fazie. Jest to odległość, jaką przebywa zaburzenie falowe w czasie jednego pełnego drgania źródła fali, czyli:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\gamma},$$



gdzie:

- $v$  — prędkość fali,
- $T$  — okres drgań (czas jednego pełnego drgania),
- $\gamma$  — częstotliwość drgań źródła fali  $\left(\gamma = \frac{1}{T}\right)$ .

Zbiór punktów, dla których funkcja falowa ma jednakową fazę, jest powierzchnią falową. Czoło fali stanowi powierzchnia falowa o zerowej fazie, tzn. powierzchnia, która oddziela część przestrzeni objętej zaburzeniem falowym od pozostałej, do której jeszcze nie dotarła fala. Czoło fali może mieć dowolny kształt. W zależności od kształtu powierzchni falowej rozróżnia się fale:

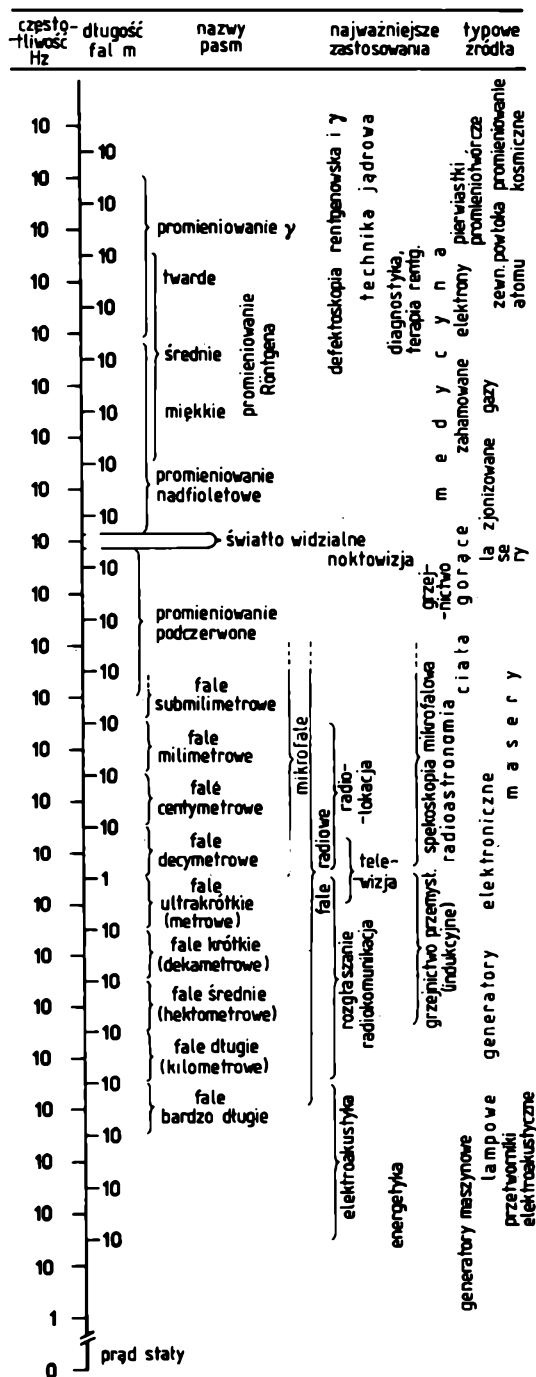
- kuliste,
- cylindryczne (walcowe),
- płaskie.

Prostopadły do czoła fali kierunek jej rozchodzenia się nazywany jest promieniem fali.

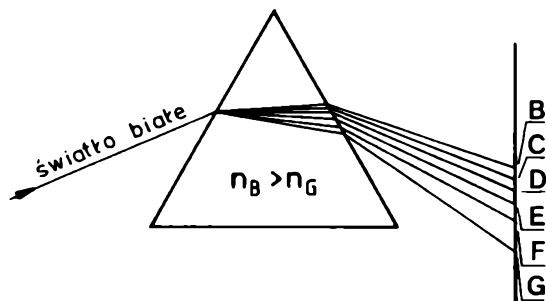
Długości fal elektromagnetycznych są zawarte w szerokim zakresie wartości, od  $10^{-14}$  m do tysięcy km. Wszystkie rodzaje tych fal, niezależnie od długości, ulegają tłumieniu, odbiciu, załamaniu, ugięciu, interferencji, dyspersji, polaryzacji (fale poprzeczne). Jednak wraz ze zmniejszaniem się długości fali (wzrostem częstotliwości) stają się coraz to bardziej „twarde”, wykazując w mniejszym stopniu cechy falowe, a w większym korpuskularne (dualizm falowo-korpuskularny). Widmo fal elektromagnetycznych podzielono na pasma, których granice ustalono umownie lub według sposobu ich generacji (rys. 3). Tylko nieznaczna część widma fal elektromagnetycznych, a mianowicie światło widzialne, jest wykrywalna bezpośrednio przez zmysły człowieka. Wrażenia świetlne wywołują u człowieka fale elektromagnetyczne o długościach od około  $0,4\mu$  (fiolet) do około  $0,76\mu$  (czerwień). Fizycy pod pojęciem światła rozumieją szerszy zakres promieniowania elektromagnetycznego, obejmujący poza obszarem widzialnym także zakresy sąsiednie („niewidzialne”):

- promienie nadfioletowe (nadfiołkowe), od około  $0,4\mu$  do  $0,05\mu$ ,
- promienie podczerwone, od około  $0,7\mu$  do około  $0,4$  mm.

Jeśli światło zawiera fale elektromagnetyczne o wszystkich długościach z widma widzialnego i w odpowiednich proporcjach, to daje wrażenie światła białego (np. światło słoneczne, światło lampy łukowej — rys. 4). Światło białe można rozszczepić (dyspersja fal), na przykład za pomocą pryzmatu, na składowe o określonej długości fali (fale monochromatyczne, światło monochromatyczne), otrzymując widmo stanowiące wstęgę barw przechodzących w sposób ciągły jedna w drugą od fioletu do czerwieni (tzw. widmo ciągłe), przy czym każdej barwie odpowiada określona długość fali i natężenie.



Rys. 3. Widmo fal elektromagnetycznych



Rys. 4. Widmo fal świetlnych

Linie Fraunhofera

Linia Fraunhofera	Długość fali w nm	Barwa
A	760,82	purpurowa
B	686,72	czerwona
C	656,28	pomarańczowa
D	589,59	żółta
E	527,00	zielona
F	486,13	niebieska
G	430,77	indygowa
H	396,85	fioletowa

Synteza barw widma słonecznego daje barwę białą. Jeśli w syntezie barw brakuje części widma światła białego, to nie otrzymujemy barwy białej. Uzyskana barwa jest barwą dopełniającą w stosunku do brakującej części widma światła białego. Barwa dopełniająca nie jest barwą prostą (monochromatyczną), której można przypisać określoną długość fali elektromagnetycznej. Jest ona barwą złożoną. Do jej wytworzenia potrzeba pewnej części barw wchodzących w skład widma słonecznego. Rozkładając pryzmatem barwę złożoną, dostaje się wszystkie barwy widma słonecznego z wyjątkiem części odpowiadającej brakującej części widma słonecznego. Barwą dopełniającą do czerwonej jest zielona, do pomarańczowej — jasnoniebieska, do żółtej — ciemnoniebieska, do zielonożółtej — fioletowa. Oko człowieka nie odróżnia barw monochromatycznych (o określonej długości fali elektromagnetycznej) od barw złożonych, otrzymywanych przez syntezę części fal elektromagnetycznych widma słonecznego. Wrażenie światła na siatkówce oka człowieka powoduje wektor elektryczny fali elektromagnetycznej.

## Współczynnik załamania światła

Fale elektromagnetyczne rozchodzą się w różnych ośrodkach z różną prędkością. Przez porównanie prędkości światła w różnych ośrodkach otrzymujemy niemianowaną liczbę, nazywaną współczynnikiem załamania światła (współczynnikiem refrakcji). Współczynnik załamania światła próżni przyjęto za równy jedności. Jeśli porównamy prędkość światła w próżni z prędkością światła w danym ośrodku, to otrzymamy bezwzględny współczynnik załamania światła:

$$n_B = \frac{V_0}{V_1},$$

gdzie:

- $n_B$  — bezwzględny współczynnik załamania światła,
- $V_0$  — prędkość światła w próżni,
- $V_1$  — prędkość światła w danym ośrodku.

W warunkach ziemskich zachodzi najczęściej kontakt badanego ośrodka z powietrzem. Toteż wygodniej jest posługiwać się w miejsce bezwzględnego współczynnika załamania światła tzw. względnym współczynnikiem załamania światła. Powstaje on przez porównanie prędkości światła w powietrzu z prędkością światła w badanym ośrodku:

$$n_w = \frac{V_p}{V_1},$$

gdzie:

- $n_w$  — względny współczynnik załamania światła,
- $V_p$  — prędkość światła w powietrzu,
- $V_1$  — prędkość światła w danym ośrodku.

Różnica między względnym i bezwzględnym współczynnikiem załamania światła występuje dopiero na czwartym miejscu po przecinku, gdyż wartość bezwzględnego współczynnika załamania światła powietrza wynosi 1,000294. Tak niewielka różnica jest zwykle pomijana w praktyce mineralogiczno-petrograficznej.

Przy przejściu światła monochromatycznego z jednego środowiska do drugiego nie zmienia się częstość drgań. Ponieważ zmienia się prędkość fali, więc inna musi być też długość fali elektromagnetycznej. Zmniejszenie prędkości fali elektromagnetycznej powoduje proporcjonalne zmniejszenie jej długości, czyli:

$$n_B = \frac{V_0}{V_1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1},$$

gdzie:

- $n_B$  — bezwzględny współczynnik załamania światła,
- $V_0$  — prędkość światła w próżni,
- $V_1$  — prędkość światła w danym ośrodku,
- $\lambda_0$  — długość fali elektromagnetycznej w próżni,
- $\lambda_1$  — długość fali elektromagnetycznej w danym ośrodku.

Współczynnik załamania światła zatem może być także wyrażony przez porównanie długości fali świetlnej w środowisku wzorcowym (np. próżni, powietrzu) z długością fali świetlnej w danym ośrodku.

Optycznie gęstszym nazywa się środowisko o większym współczynniku załamania światła, a optycznie rzadsze jest środowisko o mniejszym współczynniku załamania światła. Prędkość fali świetlnej w środowisku optycznie rzadszym jest więc większa w porównaniu z jej prędkością w środowisku optycznie gęstszym. Współczynniki załamania światła większości ośrodków względem próżni lub powietrza są przeważnie większe od jedności. Minerale, z wyjątkiem niektórych metali rodzimych (np. złoto, srebro), mają współczynniki załamania światła większe od jedności, są zatem optycznie gęstsze od powietrza i zawierają się w przedziale 1,3 (np. lód  $H_2O$ ) — 3,0 (aurypigment). Większość ważnych skałotwórczo minerałów ma współczynniki załamania światła zawarte w przedziale 1,5—1,8 (np. skalenie, kwarc, łuszczyki, węglany,

amfibole, pirokseny, minerały ilaste, chloryty, epidoty). Niektóre metale rodzime mają współczynniki załamania światła mniejsze od jedności (np. złoto rodzime  $n_{\text{Na}} = 0,366$ ; srebro rodzime  $n_{\text{Na}} = 0,181$ ; miedź rodzima  $n_{\text{Na}} = 0,641$ ).

Jak wspomniano, prędkość rozchodzenia się światła w ośrodku jednorodnym zależy od długości fali światła. Wartość współczynnika załamania światła ośrodka fizycznie jednorodnego zależy więc od długości fali użytego światła, przy czym zwykle dla światła fioletowego jest on wyższy niż dla światła czerwonego. Przyjęło się oznaczać wartość współczynników załamania światła różnych środowisk w świetle monochromatycznym żółtym (sodowym  $\lambda_{\text{Na}} = 5890\text{—}5896\text{\AA}$ ), co zaznacza się przez umieszczenie symbolu pierwiastka poniżej symbolu współczynnika załamania światła (np.  $n_{\text{Na}}$ ). Przy pobieżnych, orientacyjnych oznaczeniach wartości współczynnika załamania światła stosuje się światło białe. W bardzo dokładnych pomiarach współczynnika załamania światła podaje się także temperaturę i ciśnienie, od nich bowiem zależy również częściowo jego wartość.

Współczynniki załamania światła większości minerałów są dokładnie poznane. Precyzyjne oznaczenie wartości współczynników załamania światła pozwala czasem odróżnić minerały o bardzo podobnych właściwościach. Wartość współczynnika załamania światła minerałów określa się metodami bezpośrednimi (np. refraktometrycznie, metodą pryzmatu) lub metodami pośrednimi (np. mikroskopowymi). W praktyce mineralogiczno-petrograficznej metody bezpośrednie mają ograniczone zastosowanie. Z uwagi na specyfikę badanych obiektów (np. wielkość) w ocenie wartości współczynnika załamania światła chętniej posługujemy się metodami pośrednimi, zwłaszcza mikroskopowymi.

## Światło i granica środków optycznych

Promień świetlny przechodząc przez granicę środowisk optycznych, załamuje się wskutek zmiany prędkości fali. Część światła ulega także odbiciu od tej granicy. Promień padający, załamany i odbity oraz normalna płaszczyzny granicznej dwu środowisk optycznie izotropowych leżą w tej samej płaszczyźnie, zwanej płaszczyzną padania. Kąt padania (zawarty między promieniem padającym i normalną) i kąt odbicia (zawarty między promieniem odbitym i normalną) są sobie równe. Gdy światło przechodzi ze środowiska optycznie rzadszego do środowiska optycznie gęstszego, wówczas kąt załamania (zawarty między promieniem załamanym i normalną) jest mniejszy od kąta padania (rys. 5). Gdy światło przechodzi ze środowiska optycznie gęstszego do rzadszego, kąt załamania jest większy od kąta padania. Stosunek sinusów kąta padania ( $\alpha$ ) i kąta załamania ( $\beta$ ) jest dla danej pary środowisk wielkością stałą (prawo W. Snelliusa, 1591—1626) i równy stosunkowi prędkości światła w tych środowiskach, czyli współczynnikowi załamania światła. Stosunek ten jest miarą współczynnika załamania światła środowiska gęstszego optycznie względem środowiska rzadszego optycznie.

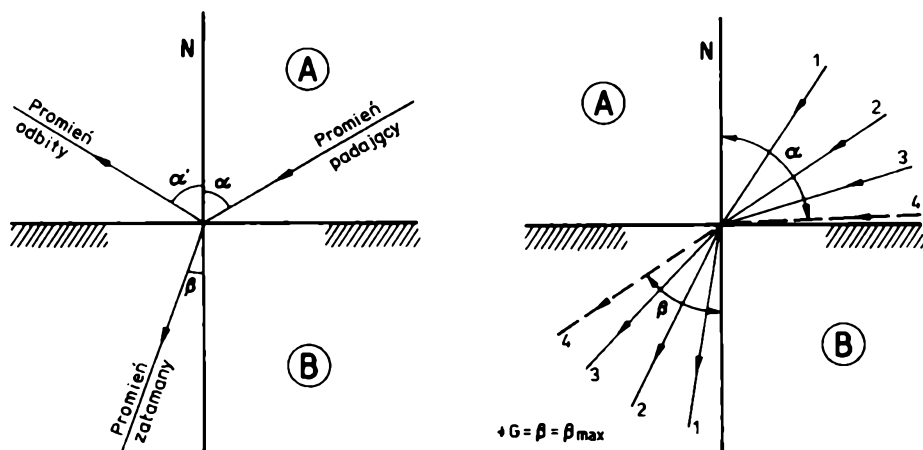
$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_R}{V_G},$$

gdzie:

- $n$  — współczynnik załamania światła środowiska gęstszego optycznie,
- $\alpha$  — kąt padania,



$\beta$  — kąt załamania,  
 $V_R$  — prędkość światła w środowisku rzadszym optycznie,  
 $V_G$  — prędkość światła w środowisku gęstszym optycznie.



Rys. 5. Zachowanie się promienia świetlnego na granicy dwóch środowisk przy przechodzeniu z ośrodka optycznie rzadszego (A) do ośrodka optycznie gęstszego (B):

$\alpha$  — kąt padania,  $\alpha'$  — kąt odbicia,  $\beta$  — kąt załamania,  $G$  — kąt graniczny

Chcąc określić współczynnik załamania światła środowiska rzadszego optycznie w stosunku do środowiska gęstszego optycznie, należy zmienić kolejność porównywanych parametrów:

$$n' = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{V_G}{V_R} = \frac{1}{n},$$

gdzie:

$n'$  — współczynnik załamania światła środowiska rzadszego optycznie (pozostałe objaśnienia jak wyżej).

Współczynnik załamania światła większy od jedności oznacza zatem, że światło przechodzi ze środowiska optycznie rzadszego do optycznie gęstszego, gdy natomiast jest on mniejszy od jedności, światło przechodzi ze środowiska optycznie gęstszego do rzadszego.

Światło przechodząc od strony środowiska optycznie rzadszego do optycznie gęstszego pod kątem padania wzrastającym do granicznej wartości  $90^\circ$  zawsze ulega w części załamaniu i w części odbiciu (promień załamany i promień odbity). Kąt załamania jest wtedy zawsze mniejszy od kąta padania ( $\beta < \alpha$ ;  $\beta_{\max} < 90^\circ$ ). Przy największym możliwym kącie padania równym  $90^\circ$  promień załamany tworzy z normalną granicy obu środowisk największy możliwy kąt załamania danej pary środowisk. Kąt ten nazywa się kątem

granicznym ( $\star G$ , rys 5). Jeśli środowiskiem rzadszym optycznie jest powietrze lub próżnia, to pomiar kąta granicznego daje możliwość obliczenia wartości współczynnika załamania światła środowiska optycznie gęstszego:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \star G} = \frac{1}{\sin \star G},$$

gdzie:

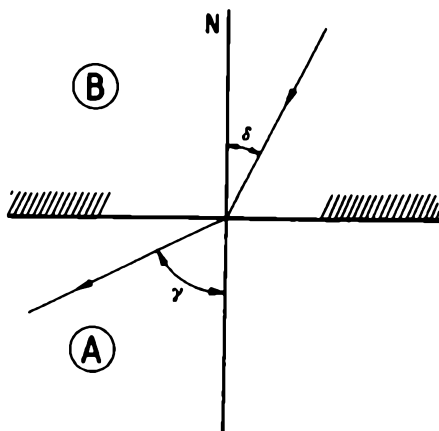
- $n$  — współczynnik załamania światła środowiska gęstszego optycznie,
- $\alpha$  — kąt padania,
- $\beta$  — kąt załamania,
- $\star G$  — kąt graniczny.

Gdy światło biegnie od strony środowiska optycznie gęstszego, załamuje się na granicy środowisk tak, że kąt załamania jest zawsze większy od kąta padania (rys. 6). Przy pewnej wartości kąta padania, charakterystycznej dla danej pary środowisk, promień załamany będzie się ślizgał po granicy środowisk (rys. 7). Wartość kąta padania pokrywa się wówczas dokładnie z wartością kąta granicznego ( $\star G$ ). Według prawa W. Snelliusa zatem:

$$n' = \frac{\sin \delta}{\sin \gamma} = \frac{\sin \star G}{\sin 90^\circ} = \sin \star G = \frac{1}{n},$$

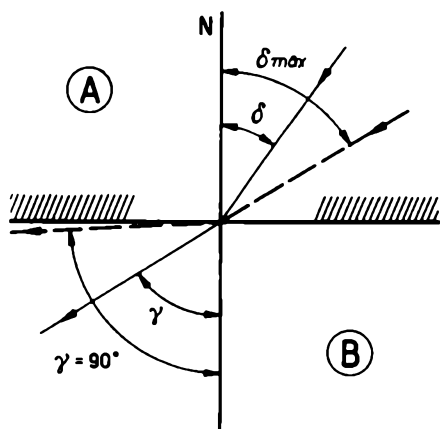
gdzie:

- $n'$  — współczynnik załamania światła środowiska rzadszego optycznie,
- $n$  — współczynnik załamania światła środowiska gęstszego optycznie,
- $\delta$  — kąt padania,
- $\gamma$  — kąt załamania,
- $\star G$  — kąt graniczny.



Rys. 6. Zachowanie się promienia świetlnego na granicy dwóch środowisk przy przechodzeniu do ośrodka optycznie rzadszego (A):

$\delta$  — kąt padania,  $\gamma$  — kąt załamania



Rys. 7. Kąt graniczny (A — środowisko gęstsze optycznie, B — środowisko rzadsze optycznie):

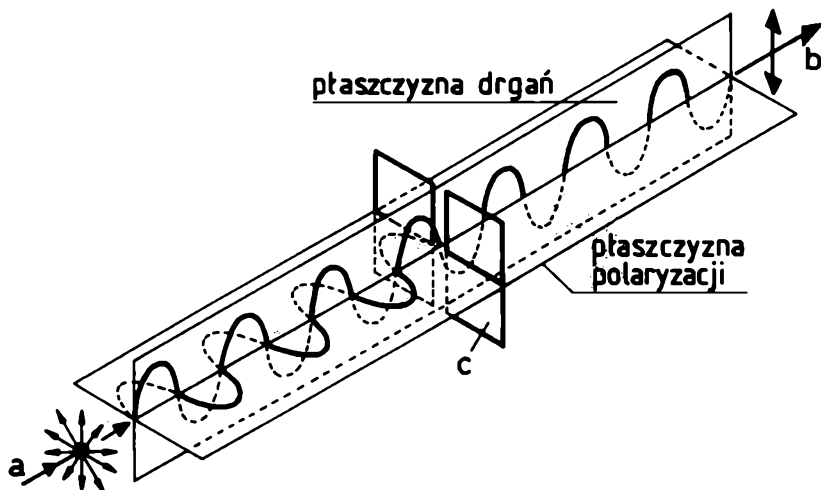
$\delta$  — kąt padania,  $\gamma$  — kąt załamania,  $\delta_{max} = G$  — kąt graniczny pary środowisk A i B

Jeśli światło, przechodząc ze środowiska optycznie gęstszego do rzadszego, padnie na granicę obu środowisk pod kątem większym od granicznego, to jego załamanie nie nastąpi, ponieważ ulegnie całkowitemu wewnętrznemu odbiciu.

## Polaryzacja światła

Pojęcie to wprowadził do optyki E. Malus (1775—1812) w celu określenia pewnych osobliwych właściwości światła odbitego od powierzchni szkła lub innego dielektryka. Jednak zjawisko polaryzacji światła było znane wcześniej. Już E. Bartholinus (1625—1698) zauważył szczególne właściwości szpatu islandzkiego (przezroczystego, grubokrystalicznego węglanu wapnia — kalcytu — wydobywanego na Islandii) dzielącego wiązkę światła na dwie składowe o osobliwych właściwościach optycznych. Szczegółowe badania tego zjawiska wykonał Ch. Huyghens (1629—1695), lecz nie znalazł wówczas ostatecznego wyjaśnienia.

Polaryzacja światła polega na częściowym lub całkowitym uporządkowaniu drgań fali świetlnej. Światło naturalne jest niespolaryzowane, a spolaryzowane częściowo jest mieszaniną światła spolaryzowanego i niespolaryzowanego. Polaryzacja fal występuje tylko w przypadku fal poprzecznych i jest związana z uporządkowaniem drgań wektorów natężenia pola magnetycznego i elektrycznego. W fali elektromagnetycznej niespolaryzowanej drgania zachodzą z równym prawdopodobieństwem we wszystkich możliwych kierunkach w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Natomiast jeśli we wszystkich punktach wzdłuż promienia fali drgania zachodzą w tym samym kierunku, to fala elektromagnetyczna jest spolaryzowana liniowo. Płaszczyzna, w której leży promień fali i kierunek drgań wektora natężenia pola elektrycznego nazywa się płaszczyzną drgań, a płaszczyzna do niej prostopadła — płaszczyzną polaryzacji (rys. 8).



Rys. 8. Polaryzacja światła:

a — fala świetlna niespolaryzowana, b — fala świetlna spolaryzowana liniowo, c — polaryzator

Jeśli koniec wektora drgań, w miarę przesuwania się wzdłuż promienia, zakreśla linię śrubową o przekroju eliptycznym, to fala jest spolaryzowana eliptycznie, jeśli o przekroju kołowym — kołowo.

Każdą falę spolaryzowaną można przedstawić jako wynik nakładania się dwu fal o tych samych długościach spolaryzowanych liniowo w kierunkach prostopadłych. Jeśli różnica faz wynosi zero, to fala wypadkowa jest spolaryzowana liniowo. Jeśli różnica faz wynosi  $\frac{\pi}{2}$ , a amplitudy są równe, to fala jest spolaryzowana kołowo. W pozostałych przypadkach fala jest spolaryzowana eliptycznie. Jeśli wektor drgań obiega elipsę lub okrąg w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara (dla obserwatora spoglądającego w kierunku źródła fali), polaryzacja jest prawoskrętna, jeśli w kierunku przeciwnym — lewoskrętna. Oko ludzkie nie odróżnia światła spolaryzowanego od niespolaryzowanego.

Polaryzacja światła może zachodzić:

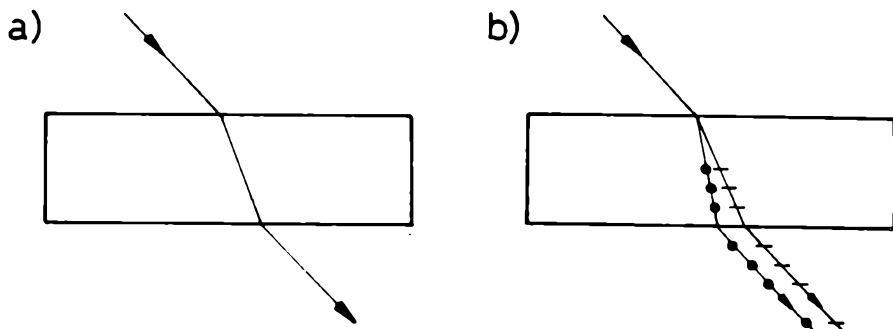
- przy odbiciu i załamaniu na granicy dwu ośrodków (zwłaszcza od powierzchni dielektryka),
- w związku z przechodzeniem przez ośrodki optycznie anizotropowe (podwójne załamanie światła, absorpcja w ośrodkach dichroicznych i polichroicznych),
- wskutek rozpraszania światła na małych cząstkach (wówczas światło obserwowane pod kątem prostym do kierunku padania wiązki jest częściowo spolaryzowane, np. pył międzygwiazdny powoduje polaryzację światła gwiazd).

## Podwójne załamanie światła

Zjawisko podwójnego załamania światła zostało odkryte w 1669 roku przez E. Bartholinusa (1625—1698), a jego teorię opracował znacznie później A. J. Fresnel (1788—1827).

Podwójne załamanie światła polega na jednoczesnym załamaniu i podziale wiązki światła przechodzącej przez granicę ośrodka anizotropowego optycznie na dwie wiązki składowe. Anizotropia optyczna jest cechą charakterystyczną ośrodka polegającą na tym, że w różnych kierunkach wykazuje on różne właściwości optyczne. W kryształach cecha ta jest spowodowana wewnętrzną strukturą, gdyż cząsteczki sieci krystalicznej stanowią w tych ciałach oscylatory anizotropowe o niejednakowej częstotliwości drgań własnych w różnych kierunkach. Powoduje to zależność prędkości światła w ośrodku anizotropowym od kierunku jego rozchodzenia się oraz kierunku polaryzacji. Ciała optycznie izotropowe mogą stać się dwójłomnymi (anizotropowymi, tzw. dwójłomność wymuszona) wskutek działania czynników zewnętrznych, wytwarzających w nich anizotropię optyczną (np. przez mechaniczne odkształcenie, oddziaływanie pola elektrycznego, pola magnetycznego). Z podwójnym załamaniem światła w kryształach zawsze jest związana polaryzacja powstałych wiązek składowych światła, a ich płaszczyzny polaryzacji są względem siebie prostopadłe. Jednakże nie wszystkie kryształy są anizotropowe optycznie. Część z nich ma właściwości ciał izotropowych optycznie. Pod tym względem zachowują się one tak samo jak bezpostaciowe ciała stałe (np. szkło, żel, żywice), ciekłe (np. woda, gliceryna) i gazowe (np. powietrze).

Kryształy izotropowe oraz bezpostaciowe substancje mineralne załamują światło pojedynczo (rys. 9a), spełniając prawo W. Snelliusa. Współczynnik załamania światła (współczynnik refrakcji) większości minerałów i bezpostaciowych substancji mineralnych mieści się w przedziale 1,40—1,85 i jest ich indywidualną cechą o dużym znaczeniu diagnostycznym.



Rys. 9. Załamanie światła:

a) w środowisku optycznie izotropowym, b) w środowisku optycznie anizotropowym

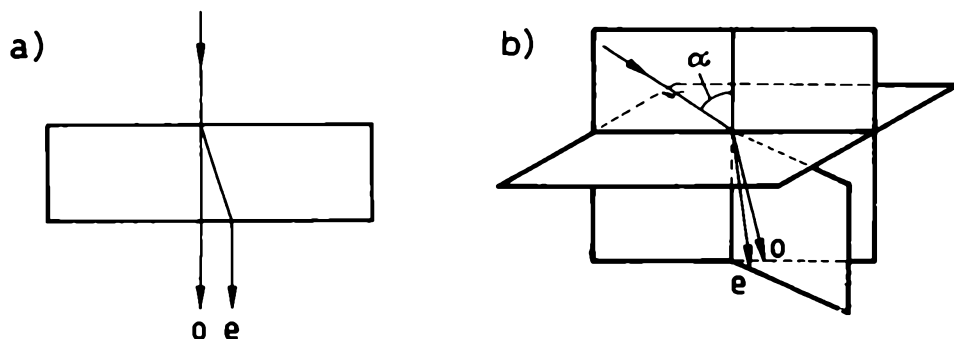
W kryształach anizotropowych optycznie zachodzi podwójne załamanie światła z jednoczesną polaryzacją powstałych wiązek składowych (rys. 9b). Wiązka światła w takich kryształach rozdziela się na dwie wiązki odchylone niejednakowo od kierunku wiązki padającej i w ogólnym przypadku leżące w innej płaszczyźnie niż wiązka padająca i normalna powierzchni granicznej kryształu.

Jeśli promień światła jest skierowany prostopadłe do powierzchni granicznej płytki płaskorównoległej z kryształu anizotropowego, to mogą zaistnieć dwa przypadki:

1. Promień światła padającego rozdzieli się na dwa, z których jeden będzie miał kierunek promienia padającego, a drugi ulegnie odchyleniu. Po wyjściu z kryształu oba promienie są do siebie równoległe i mają kierunek promienia padającego (rys. 10a). Promień przechodzący przez kryształ bez załamania nazywa się promieniem zwyczajnym, oznaczanym symbolem *o* (*radius ordinarius*). Promień ten podlega prawu W. Snelliusa. Promień odchylony od pierwotnego kierunku nazywa się promieniem nadzwyczajnym, oznaczanym symbolem *e* (*radius extraordinarius*). Promień ten nie podporządkowuje się prawu W. Snelliusa. Dokonując rotacji płytką płaskorównoległą dookoła normalnej promień zwyczajny *o* nie zmieni swego położenia, natomiast promień nadzwyczajny *e* zakreśli krąg. Promień nadzwyczajny *e* znajduje się zawsze w tzw. przekroju głównym prześwietlanego kryształu, czyli w płaszczyźnie zawierającej kierunek promienia padającego i oś krystalograficzną *Z*. Przez obrót płytkę krystaliczną zatem dokonujemy rotacji przekrojem głównym kryształu i zawartym w nim promieniem nadzwyczajnym.



Gdy promień światła jest skierowany na płytkę płaskorównoległą ukośnie (rys. 10b), wtedy otrzymujemy również promień zwyczajny i nadzwyczajny.



Rys. 10. Załamanie światła w kryształach optycznie jednoosiowych:

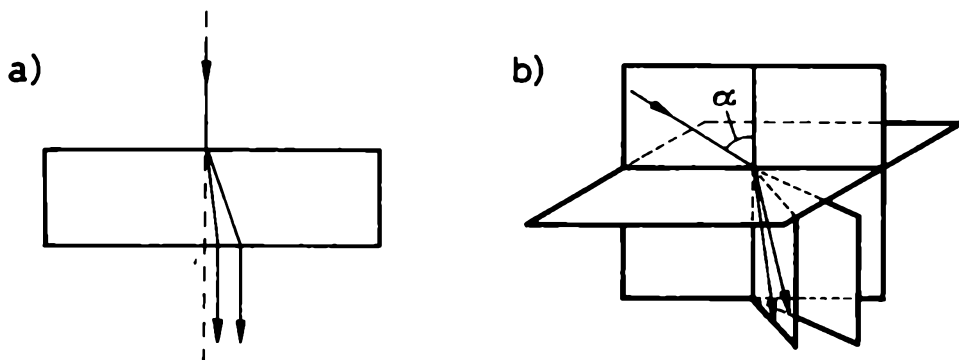
a) wiązka światła prostopadła do powierzchni przekroju kryształu, b) wiązka światła ukośna do powierzchni przekroju kryształu;  
o — promień zwyczajny, e — promień nadzwyczajny,  $\alpha$  — kąt padania

Promień zwyczajny leży wówczas w płaszczyźnie padania, a promień nadzwyczajny w płaszczyźnie przekroju głównego kryształu. Przez rotację płytki płaskorównoległej można doprowadzić do zgodności płaszczyzny padania z płaszczyzną przekroju głównego. Wówczas promień zwyczajny i nadzwyczajny znajdą się w jednej płaszczyźnie (tj. płaszczyźnie padania promienia skierowanego ukośnie). Promień światła biegnący zgodnie z kierunkiem osi kryystalograficznej  $Z$  w kryształach nie ulega podwójnemu załamaniu światła i polaryzacji, a współczynnik załamania światła dla tego kierunku będzie równy współczynnikowi załamania światła promienia zwyczajnego. Kierunek ten jest nazywany osią optyczną. Zgodnie z kierunkiem osi optycznej promień zwyczajny i nadzwyczajny zlewają się w jeden i dlatego często nazywa się ten kierunek „osią izotropii” lub „kierunkiem izotropii”.

W takich kryształach prędkość promienia zwyczajnego, a zatem i wartość jego współczynnika załamania światła, oznaczana symbolem  $n_o$ , jest stała i niezależna od kierunku, natomiast prędkość promienia nadzwyczajnego, a tym samym wartość jego współczynnika załamania światła, oznaczana symbolem  $n_e$ , jest zmienna i zależna od kierunku. Największa różnica wartości współczynników załamania światła promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego występuje w kierunku prostopadłym do osi optycznej („osi izotropii”). Natomiast brakiem różnicy charakteryzuje się kierunek zgodny z osią optyczną. Jak już wspomniano, przejściu światła przez kryształ anizotropowy towarzyszy jego polaryzacja. Drgania promienia nadzwyczajnego zachodzą zawsze w płaszczyźnie przekroju głównego, a drgania promienia zwyczajnego w płaszczyźnie doń prostopadłej. W przypadku gdy światło biegnie zgodnie z osią optyczną, nie ulega ono podwójnemu załamaniu i nie zostaje przez kryształ

spolaryzowane, gdyż kierunek ten zawiera nieskończenie wiele przekrojów głównych.

2. Promień światła padającego rozdzieli się na dwie składowe na ogół odchylone od kierunku wiązki padającej (rys. 11). Po wyjściu z kryształu oba promienie będą do siebie równoległe i będą miały kierunek wiązki padającej.



Rys. 11. Załamanie światła w kryształach optycznie dwuosiowych:

a) wiązka światła prostopadła do powierzchni przekroju kryształu, b) wiązka światła skośna do powierzchni przekroju kryształu;  
 $\alpha$  — kąt padania

W takich kryształach nie można wyróżnić promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego, gdyż obydwa promienie nie stosują się do prawa W. Snelliusa i zachowują się jak promienie nadzwyczajne. Prędkość ich zależy od kierunku drogi promienia w kryształach, a tym samym i wartość ich współczynników załamania światła. Obie wiązki powstałe w wyniku podwójnego załamania są spolaryzowane w płaszczyznach względem siebie prostopadłych. W kryształach takich występują dwa symetrycznie położone „kierunki izotropii”, w których promienie powstałe w wyniku podwójnego załamania mają tę samą prędkość, a więc równe współczynniki załamania światła. Kierunki te noszą nazwę osi optycznych. Różni je niższa symetria optyczna w porównaniu z kierunkiem osi optycznej kryształów jednoosiowych wytwarzających promień zwyczajny i nadzwyczajny. W kryształach wytwarzających dwa promienie nadzwyczajne światło biegnąc w kierunku jednej z osi optycznych, rozpada się po wyjściu z kryształu na nieskończenie wiele promieni tworzących poboczną stożka (refrakcja stożkowa).

# Podział kryształów na grupy optyczne

Ze względu na właściwości optyczne kryształy dzieli się na:

- kryształy optycznie izotropowe (równokierunkowe), które charakteryzuje stała, niezależna od kierunku, prędkość rozchodzenia się światła, a tym samym stała, niezależna od kierunku, wartość współczynnika załamania światła; tak wysoką symetrię optyczną wykazują kryształy z układu regularnego,
- kryształy optycznie anizotropowe (różnokierunkowe), które charakteryzuje zmienna, zależna od kierunku, prędkość rozchodzenia się światła, a tym samym zmienna, zależna od kierunku, wartość współczynników załamania światła; kryształy takie podwójnie załamują światło, a każdy z obu powstałych promieni jest spolaryzowany w płaszczyznach względem siebie prostopadłych; taką symetrię optyczną wykazują wszystkie kryształy nie należące do układu regularnego.

Kryształy anizotropowe dzieli się z kolei na:

a) optycznie jednoosiowe, czyli posiadające jeden kierunek osi optycznej i wytwarzające w wyniku podwójnego załamania spolaryzowany promień zwyczajny i nadzwyczajny; w tej grupie mieszczą się wszystkie kryształy trygonalne, tetragonalne i heksagonalne;

b) optycznie dwuosiowe, czyli posiadające dwa kierunki osi optycznych i wytwarzające w wyniku podwójnego załamania spolaryzowane promienie zachowujące się, jak promień nadzwyczajny kryształów optycznie jednoosiowych; w tej grupie mieszczą się wszystkie kryształy rombów, jednoskośne i trójskośne.

## Obrazowanie właściwości optycznych kryształów

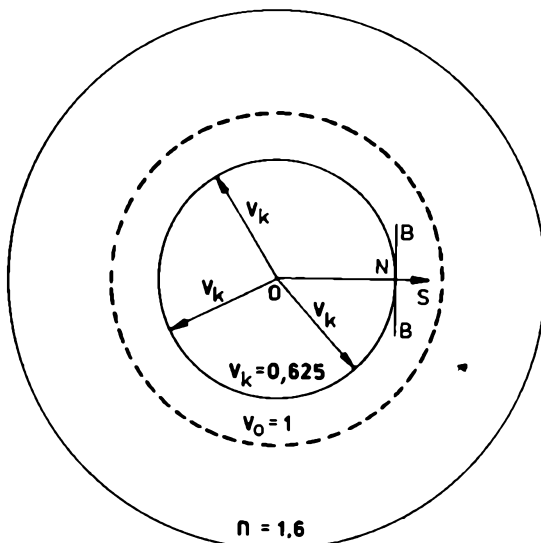
Stan optyczny kryształu charakteryzuje:

- prędkość promienia światła w różnych kierunkach,
- prędkość czoła fali światła w różnych kierunkach,
- wartość współczynników załamania światła w różnych kierunkach.

W kryształach optycznie izotropowych (z układu regularnego) prędkość promienia, prędkość fali i wartość współczynnika załamania światła są niezależne od kierunku. W kryształach optycznie anizotropowych (pozostałe układy krystalograficzne) główne parametry optyczne zależą od kierunku, w jakim przemieszcza się światło przez kryształ.

Stan optyczny kryształu można odwzorować geometrycznie za pomocą powierzchni jedno- i dwupowłokowych lub algebraicznie za pomocą odpowiednich, często zawiłych równań i funkcji. Odwzorowania te odnoszą się do właściwości optycznych kryształów w świetle monochromatycznym. Najchętniej w praktyce mineralogiczno-petrograficznej posługujemy się odwzorowaniami geometrycznymi, szczególnie jednopowłokowymi.

Zależność prędkości promieni od kierunku przedstawia powierzchnia prędkości promieni. W przypadku ciał optycznie izotropowych jest to powierzchnia kuli. Ponieważ w kryształach optycznie izotropowych prędkość promienia jest równa prędkości czoła fali, więc powierzchnia obrazująca tę prędkość ciałach optycznie izotropowych jest powierzchnią kuli i obie powierzchnie pokrywają się. Kula odwzorowuje także wartość współczynnika załamania światła w kryształach izotropowych, gdyż nie zależy ona od kierunku (rys. 12).



Rys. 12. Powierzchnia współczynnikowa, prędkości promieni oraz fali światła w kryształach optycznie izotropowych:

$O$  — źródło fal elektromagnetycznych we wnętrzu ciała optycznie izotropowego,  $V$  — prędkość fali światła,  $BB$  — czoło fali,  $OS$  — promień świetlny,  $ON$  — normalna czoła fali,  $V_0$  — prędkość światła w powietrzu,  $V_k$  — prędkość światła w kryształach izotropowych,  $n$  — współczynnik załamania światła kryształu izotropowego

$$\left( n = \frac{V_0}{V_k} \right)$$

Jeśli przyjmimy prędkość światła w powietrzu za wartość wzorcową, to prędkość światła w większości kryształów izotropowych będzie mniejsza od prędkości w powietrzu. Zatem, zgodnie z zależnością:

$$n_w = \frac{V_p}{V_k},$$

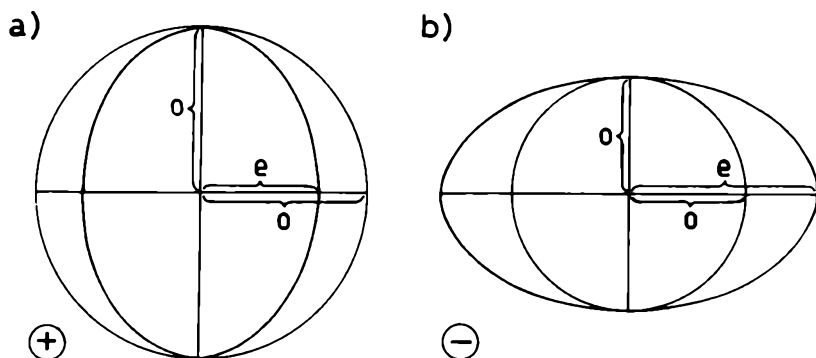
gdzie:

- $n_w$  — względny współczynnik załamania światła,
- $V_p$  — prędkość światła w powietrzu,
- $V_k$  — prędkość światła w kryształach izotropowych,

wartość współczynnika załamania światła kryształu izotropowego będzie odwrotnie proporcjonalna do prędkości promienia i prędkości fali. W rezultacie więc, geometrycznie, im większy będzie promień kuli odwzorowującej wartość współczynnika załamania światła w kryształach izotropowych, tym mniejszy będzie promień kuli odwzorowującej prędkość fali i prędkość promienia. Obie powierzchnie odwzorowania są rozmieszczone współśrodkowo (rys. 12).

Dla kryształów anizotropowych powierzchnia prędkości promieni jest dwupowłokowa, gdyż — z wyjątkiem kierunku osi optycznej — w każdym innym kierunku prędkość obu promieni jest różna.

W kryształach jednoosiowych powłoka obrazująca prędkości promienia zwyczajnego  $o$  ma kształt kuli, ponieważ nie zależy od kierunku. Powłoka obrazująca prędkości promienia nadzwyczajnego  $e$  jest elipsoidą obrotową wpisaną lub opisaną na tej kuli (rys. 13). Kierunek łączący punkty styczności obu powłok jest kierunkiem osi optycznej, który w kryształach jednoosiowych zawsze pokrywa się z kierunkiem osi krystalograficznej  $Z$ . Największą różnicę prędkości wykazują promienie biegnące prostopadłe do osi optycznej. W zależności od stosunków prędkości promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego wyróżnia się (rys. 13):



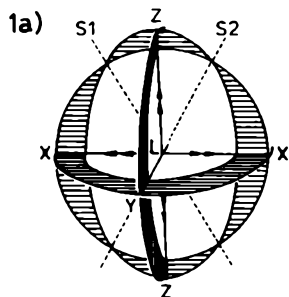
Rys. 13. Dwupowłokowa powierzchnia prędkości promieni kryształów jednoosiowych, dodatnich (a) i ujemnych (b):

$o$  — prędkość promienia zwyczajnego,  $e$  — prędkość promienia nadzwyczajnego

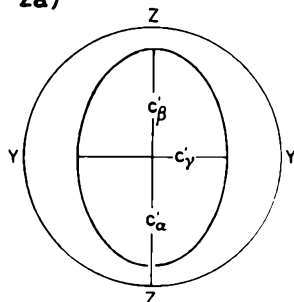
- kryształy jednoosiowe ujemne, gdy  $e > o$  (elipsoida obrotowa opisana na kuli),
- kryształy jednoosiowe dodatnie, gdy  $e < o$  (elipsoida obrotowa wpisana w kulę).

W kryształach dwuosiowych oba promienie mają właściwości promienia nadzwyczajnego kryształów jednoosiowych i prędkość zależną od kierunku ich biegu w kryształ. Powłoki zatem obrazujące prędkość każdego z promieni załamanych w kryształ dwuosiowym optycznie nie są kulą, lecz elipsoidą. Przenikając się wzajemnie, tworzą skomplikowaną i trudną do graficznego przedstawienia bryłę (rys. 14).

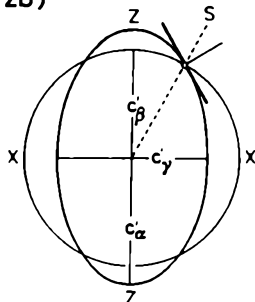
W kryształach anizotropowych kierunek promienia nadzwyczajnego i kierunek odpowiadającej mu fali różnią się; inna jest prędkość promienia nadzwyczajnego, a inna prędkość czoła fali należące do tego promienia.



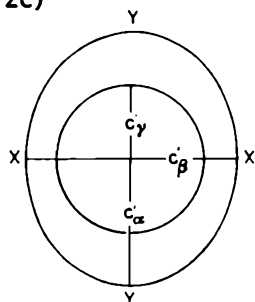
2a)



2b)



2c)

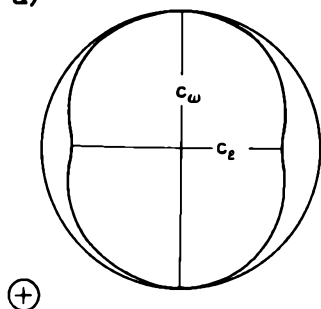


Rys. 14. Dwupowłokowa powierzchnia prędkości promieni kryształów dwuosiowych (1a) oraz jej główne przekroje (2a, 2b, 2c):

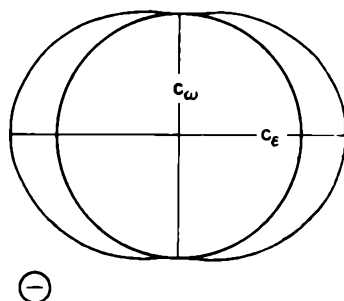
$XYZ$  — osie krystalograficzne,  $S1, S2$  — osie optyczne (biradialne),  $L$  — źródło fal elektromagnetycznych,  $C_\alpha, C_\beta, C_\gamma$  — prędkość promieni

Dlatego w kryształach jednoosiowych powłoka prędkości fali zwyczajnej jest kulą, natomiast prędkości fali nadzwyczajnej ma kształt owaloidy obrotowej (rys. 15). Z porównania dwupowłokowej powierzchni prędkości

a)



b)



Rys. 15. Dwupowłokowa powierzchnia prędkości czoła fali kryształów jednoosiowych dodatnich (a) i ujemnych (b):

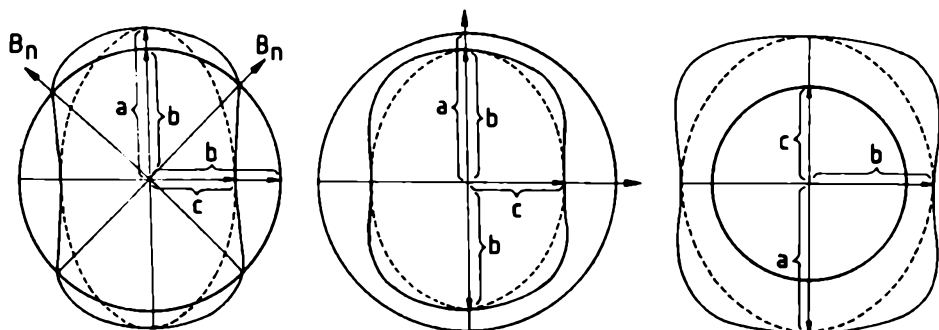
$c_\omega$  — prędkość czoła fali zwyczajnej,  $c_\epsilon$  — prędkość czoła fali nadzwyczajnej



promieni (rys. 13) z dwupowłokową powierzchnią prędkości fali wynika, że w kierunku osi optycznej i w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej kryształów jednoosiowych prędkość promieni nie różni się od prędkości czoła fali należącego do tych promieni. Głównymi pólami owaloidy obrotowej kryształów jednoosiowych są wektory  $o$  i  $e$ . Ze stosunków prędkości fal da się wyróżnić:

- kryształy jednoosiowe ujemne, gdy owaloida obrotowa jest opisana na kuli ( $e > o$ ),
- kryształy jednoosiowe dodatnie, gdy owaloida obrotowa jest wpisana w kulę ( $e < o$ ).

W kryształach dwuosiowych obie powłoki obrazujące prędkości czoła fal należących do powstałych w wyniku podwójnego załamania promieni mają kształt owaloid obrotowych trudny do przedstawienia graficznego (rys. 16).



Rys. 16. Główne przekroje dwupowłokowej powierzchni prędkości czoła fal dla kryształów dwuosiowych:

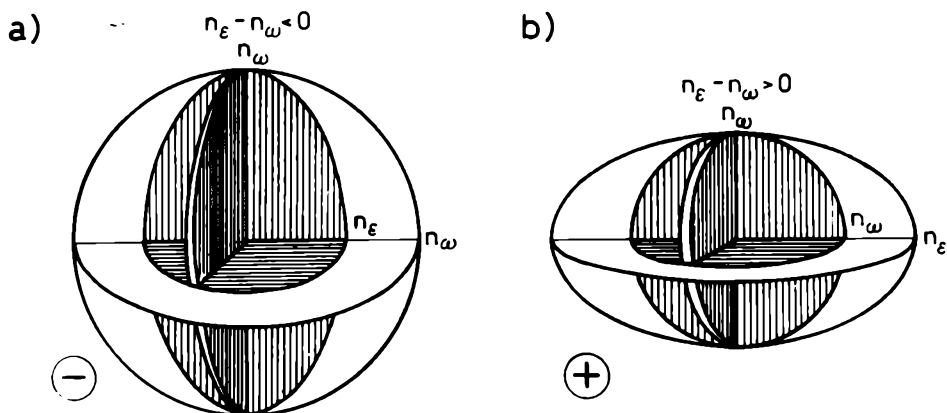
$B_n$  — binormalne (osie optyczne)

W kryształach anizotropowych współczynniki załamania światła odnoszą się do czoła fal wytworzonych podwójnym załamaniem i są odwrotnie proporcjonalne do ich prędkości.

W kryształach jednoosiowych obrazem graficznym wartości współczynnika załamania światła fali zwyczajnej jest kula, a fali nadzwyczajnej — elipsoida obrotowa (rys. 17). Promień kuli wyraża wartość współczynnika załamania fali zwyczajnej ( $n_o$ ), natomiast zmienność współczynnika załamania fali nadzwyczajnej ( $n_e$ ) — elipsoida obrotowa, której pólami są wektory  $n_o$  i  $n_e$ . Oś obrotu tej elipsoidy jest wektor  $n_o$ . Punkty styczności kuli z elipsoidą wyznaczają kierunek osi optycznej, który w kryształach jednoosiowych jest jednocześnie kierunkiem osi krystalograficznej Z.

Gdy w kryształach jednoosiowych:

$n_e < n_o$ , czyli  $n_e - n_o < 0$  — elipsoida jest wpisana w kulę, a znak optyczny kryształu jest ujemny,



Rys. 17. Dwupowłokowa powierzchnia współczynnikowa kryształów jednoosiowych ujemnych (a) i dodatnich (b)

$n_e > n_o$ , czyli  $n_e - n_o > 0$  — elipsoida jest opisana na kuli, a znak optyczny kryształu jest dodatni.

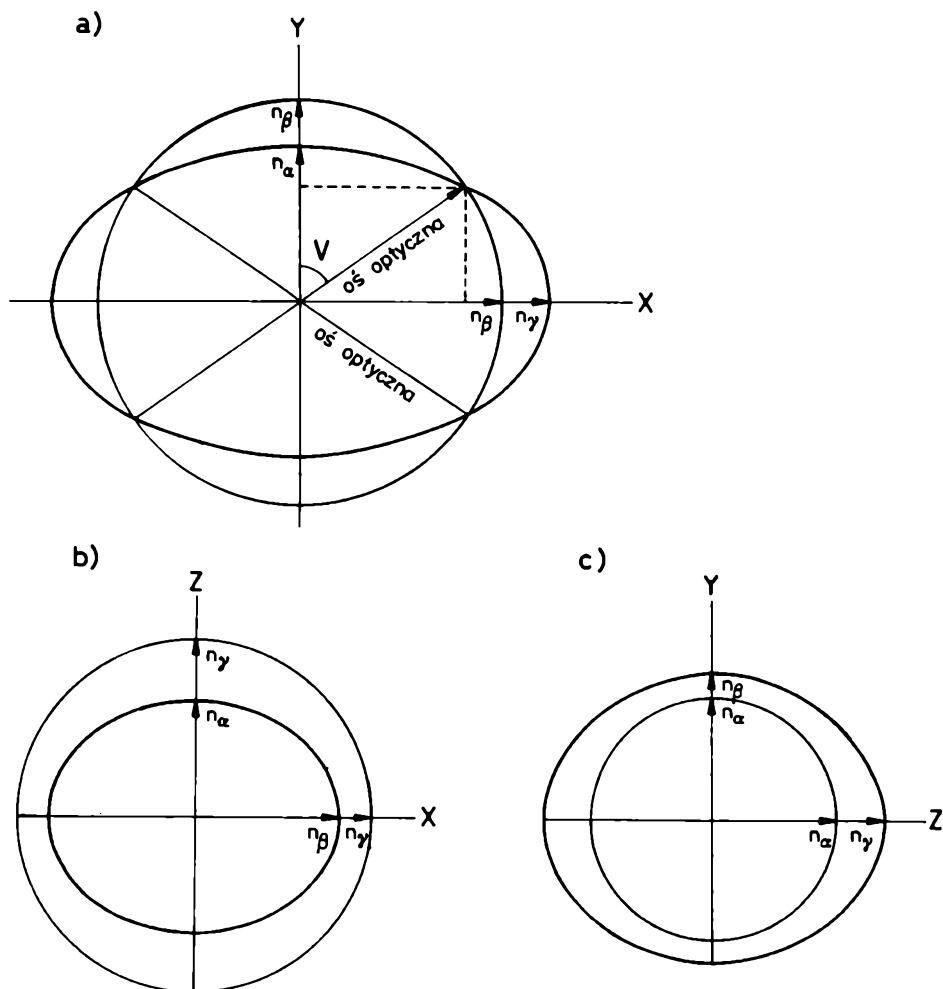
W kryształach dwuosiowych żadna z powłok współczynnikowych nie jest kulą. Odwzorowanie tworzą wzajemnie przenikające się elipsoidy obrotowe, których punkty przecięcia wytyczają dwa symetrycznie położone kierunki osi optycznych (binormalne, rys. 18).

Obrazowanie właściwości optycznych kryształów z zastosowaniem powierzchni dwupowłokowych daje pełną informację o wartości współczynników załamania światła, prędkości promieni, prędkości fal i dwójłomności dla dowolnie wybranego kierunku w kryształach. Znacznie prostszym geometrycznym sposobem zobrazowania stanu optycznego kryształu jest posłużenie się powierzchnią jednopowłokową. Odpowiednikami omówionych powierzchni dwupowłokowych są:

- indyktrysa, czyli elipsoida współczynnikowa,
- elipsoida Fresnela, czyli elipsoida prędkości promieni,
- owaloida prędkości fal.

W praktyce mineralogiczno-petrograficznej szczególne znaczenie ma indyktrysa, czyli jednopowłokowa powierzchnia współczynników załamania światła, która jest albo elipsoidą obrotową (kryształy jednoosiowe), albo elipsoidą trójosiową (kryształy dwuosiowe).

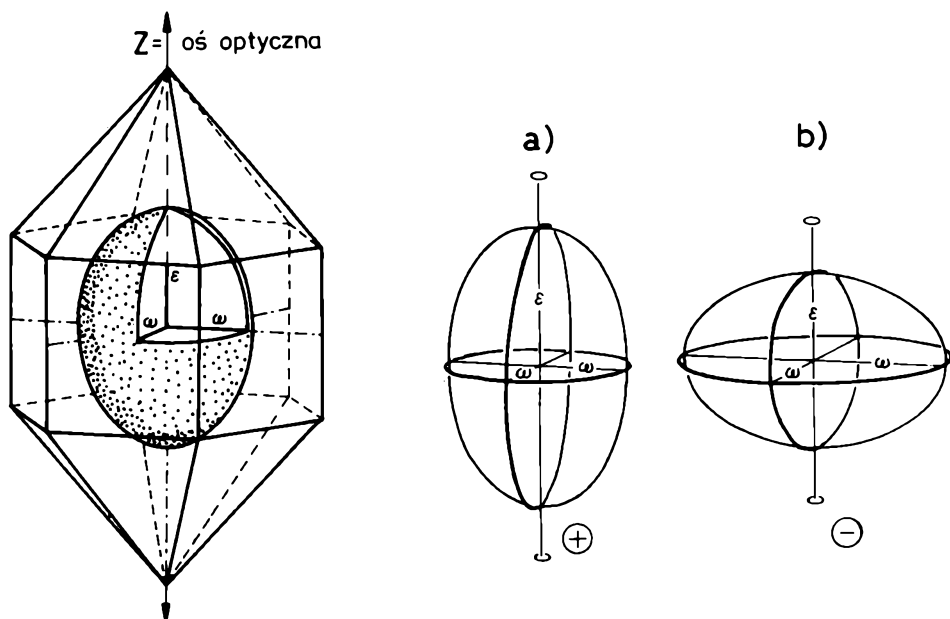
Półosiami elipsoidy obrotowej są wektory  $n_e$  i  $n_o$  (rys. 19). Zgodnie z osią obrotu elipsoidy leży wektor  $n_e$ . Wektor  $n_o$  znajduje się w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu w tzw. przekroju kołowym elipsoidy obrotowej. Warto przy tym zaznaczyć, że wszystkie pozostałe przekroje elipsoidy obro-



Rys. 18. Dwupowłokowa powierzchnia wartości współczynników załamania światła kryształów dwuosowych (główne przekroje powierzchni dwupowłokowej):

a) w płaszczyźnie osi optycznych, b) w płaszczyźnie zawierającej normalną optyczną i wektor odpowiadający najmniejszej wartości współczynnika załamania światła w kryształach, c) w płaszczyźnie zawierającej normalną optyczną i wektor odpowiadający największej wartości współczynnika załamania światła w kryształach; X — kierunek w kryształach odpowiadający najmniejszej wartości współczynnika załamania światła w kryształach, Y — kierunek w kryształach odpowiadający największej wartości współczynnika załamania światła w kryształach, Z — kierunek normalnej optycznej,  $V$  — połowa kąta osi optycznych

towej są przekrojami eliptycznymi. Przekroje eliptyczne zawierające oś optyczną są zwane przekrojami głównymi elipsoidy. Jest ich nieskończenie wiele. Dla kryształów jednoosiowych dodatnich ( $n_e > n_o$ ) elipsoida obrotowa jest wydłużona biegunowo. Zgodnie z wydłużeniem elipsoidy przebiega oś optyczna kryształu, która zlewa się z osią krystalograficzną Z. Dla kryształów jednoosiowych ujemnych ( $n_e < n_o$ ) elipsoida obrotowa jest spłaszczona biegunowo.



Rys. 19. Indykatrysy kryształów jednoosiowych dodatnich (a) i ujemnych (b) oraz ich stosunek do bryły geometrycznej kryształu (na przykładzie kwarcu pirogenicznego)

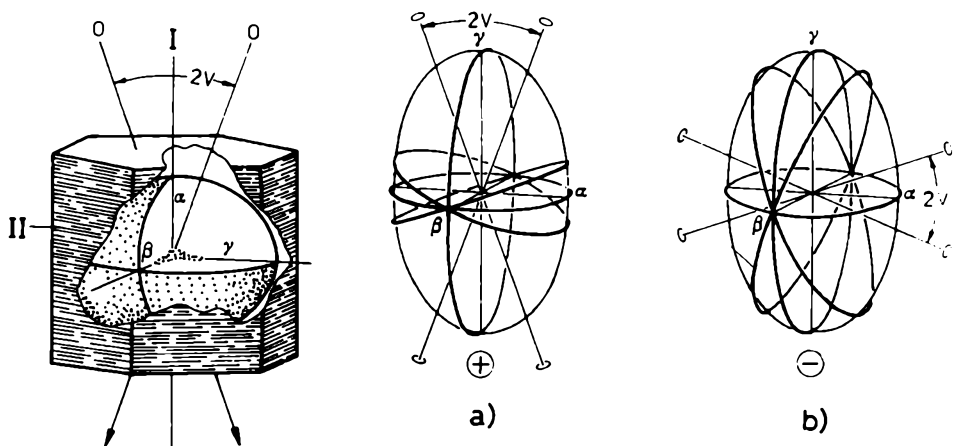
Zgodnie z wektorem optycznym  $n_z$  przebiega oś optyczna kryształu jednoosiowego ujemnego i oś krystalograficzna Z. Drgania spolaryzowanego promienia nadzwyczajnego zachodzą w kryształach jednoosiowych zawsze w płaszczyźnie przekroju głównego, natomiast drgania spolaryzowanego promienia zwyczajnego są do tej płaszczyzny prostopadłe.

Półosiami elipsoidy trójosiowej (kryształy dwuosiowe) są prostopadłe do siebie wektory optyczne:

- $n_\gamma$ ; wyrażający największą możliwą wartość współczynnika załamania światła,
- $n_\alpha$ ; wyrażający najmniejszą możliwą wartość współczynnika załamania światła,
- $n_\beta$ ; wyrażający wartość pośrednią.

W elipsoidzie trójosiowej występują dwa symetrycznie położone przekroje kołowe, których promień ma wartość  $n_\beta$ . Normalne tych przekrojów wyznaczają położenie osi optycznych w kryształach dwuosiowych. Osie optyczne znajdują się w płaszczyźnie zawierającej wektory  $n_\alpha$  i  $n_\gamma$ , nazywanej płaszczyzną osi optycznych. Wektor  $n_\beta$  jest prostopadły do płaszczyzny osi optycznych i nosi nazwę normalnej optycznej (rys. 20). Wektory  $n_\alpha$  i  $n_\gamma$  są dwusiecznymi kątów utworzonych przez osie optyczne. Mianem pierwszej dwusiecznej określa się ten wektor optyczny, który występuje w kącie ostrym między osiami optycznymi, natomiast drugą dwusieczną jest ten wektor optyczny, który

występuje w kącie rozwartym między osiami optycznymi. W kryształach dwuosowych dodatnich pierwszą dwusieczną jest wektor  $n_y$ , a w kryształach dwuosowych ujemnych pierwszą dwusieczną jest wektor  $n_x$ . Kąt między osiami optycznymi oznacza się symbolem  $2V$ . Jeśli kąt zawiera wektor  $n_y$ , to oznacza się go symbolem  $2V_y$ . Jeśli kąt zawiera wektor  $n_x$ , to oznacza się go symbolem  $2V_x$ . Jeśli kąt między osiami optycznymi będzie równy  $0^\circ$ , to kryształ taki przekształca się w jednoosiowy optycznie, a jego obrazem geometrycznym będzie elipsoida obrotowa. Jeśli kąt między osiami optycznymi będzie prosty ( $2V = 90^\circ$ ), to nie można wyróżnić pierwszej i drugiej dwusiecznej, a kryształ taki nazywa się **neutralnym** (dodatnio-ujemnym).



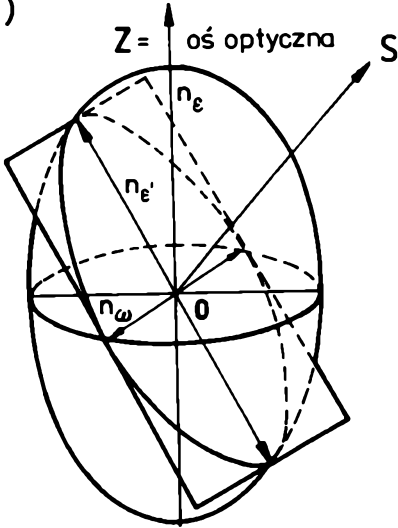
Rys. 20. Indykatrysy kryształów dwuosowych dodatnich (a) i ujemnych (b) oraz ich stosunek do bryły geometrycznej kryształu (na przykładzie muskowitu)

Indyktrysa umożliwia wyznaczenie dla każdego kierunku fali świetlnej płaszczyzn drgań promieni, powstałych wskutek podwójnego załamania, i ich polaryzacji oraz określenie wartości współczynników załamania światła związanych z tymi kierunkami. Dla ich wyznaczenia konieczne jest zastosowanie tzw. konstrukcji Fresnela (rys. 21a). Przecinając indyktryse płaszczyzną prostopadłą do kierunku padania światła (płaszczyznę tę można korelować z płaszczyzną preparatu mikroskopowego), otrzymujemy elipsę, której półosie są miarą wartości współczynników załamania światła, a ich położenie wyznacza jednocześnie płaszczyzny drgań promieni powstałych w wyniku podwójnego załamania oraz polaryzacji. Płaszczyzny te są wzajemnie prostopadłe.

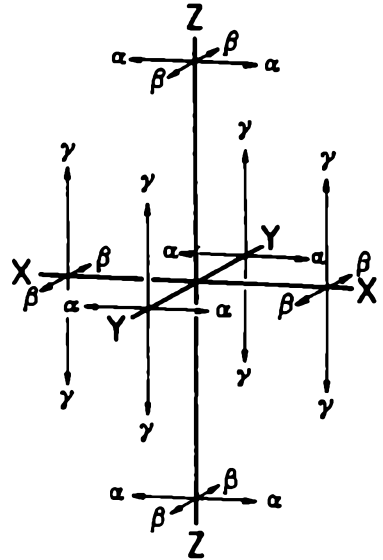
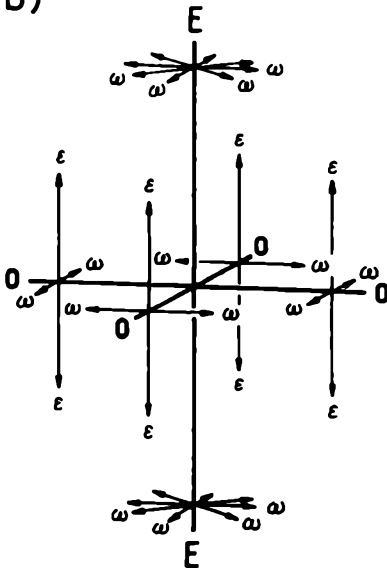
Bezwzględna różnicę współczynników załamania światła określa się mianem dwójłomności i oznacza symbolem „ $\Delta$ ”. W kryształach jednoosiowych bezwzględna wartość dwójłomności jest zawsze największa w kierunku prostopadłym do osi optycznej. Światło przechodzące w kierunku osi optycznej nie ulega podwójnemu załamaniu, gdyż dwójłomność wynosi 0. Ponieważ wartość współczynnika

załamania fali nadzwyczajnej biegnącej w kryształach jednoosiowych ukośnie do osi optycznej wynosi  $n'_e$ , dwójłomność dla kierunków ukośnych  $n'_e - n_o = \Delta'$ .

a)



b)



Rys. 21. Konstrukcja Fresnela:

a) zasada konstrukcji Fresnela, b) kierunki drgań fal świetlnych biegnących w kierunku głównych wektorów optycznych indyktrysy;

OS — kierunek biegu światła w kryształach,  $o, n_e, n_o$  — płaszczyzna prostopadła do kierunku biegu światła w kryształach (płaszczyzna preparatu mikroskopowego)

Wartość dwójłomności dla kierunków ukośnych w stosunku do osi optycznej będzie się zawierała między 0 i bezwzględną maksymalną wartością dwójłomności. Podawane w podręcznikach wartości  $n_z$  i  $\Delta$  dla poszczególnych minerałów odnoszą się do ich maksymalnych wartości w minerale.

W kryształach dwuosiowych bezwzględna wartość dwójłomności jest zawsze największa dla światła biegnącego prostopadle do płaszczyzny osi optycznych, czyli zgodnie z kierunkiem normalnej optycznej (wektora  $n_\beta$ ) i wynosi  $n_\gamma - n_\alpha = \Delta$ . Światło biegnące zgodnie z kierunkiem osi optycznych nie ulega podwójnemu załamaniu. W tych kierunkach występuje tylko refrakcja stożkowa. Jeśli światło biegnie w kryształ dwuosiowym zgodnie z kierunkiem  $n_\gamma$ , to kierunki drgań oraz wartości współczynników załamania światła będzie wyznaczać położenie półośi  $n_\alpha$  i  $n_\beta$  elipsy powstałej z przecięcia elipsoidy trójosiowej płaszczyzną prostopadłą do kierunku padania promienia światła (rys. 21b'). Jeśli światło biegnie zgodnie z kierunkiem  $n_\alpha$ , to analogiczne parametry promieni załamanych będzie wyznaczać położenie wektorów  $n_\beta$  i  $n_\gamma$ . Dwójłomność tych kierunków określa bezwzględna różnica współczynników załamania światła, odpowiednio:  $n_\beta - n_\alpha$  i  $n_\gamma - n_\beta$ . Dla dowolnego kierunku biegu światła w kryształ dwuosiowym kierunki drgań oraz wartości współczynników załamania światła powstałych promieni będą określać półośie elipsy powstałej z przecięcia się elipsoidy trójosiowej z płaszczyzną prostopadłą do kierunku padania światła, oznaczane  $n'_\gamma - n'_\alpha = \Delta'$  i określane jako:

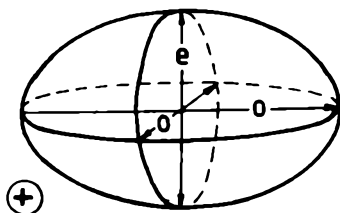
- $n'_\gamma$  — większy współczynnik załamania światła dowolnego przekroju kryształu dwuosiowego,
- $n'_\alpha$  — mniejszy współczynnik załamania światła dowolnego przekroju kryształu dwuosiowego,
- $\Delta'$  — dwójłomność dowolnego przekroju kryształu dwuosiowego, tzw. dwójłomność cząstkowa.

Podawane w podręcznikach wartości  $n_\gamma$ ,  $n_\beta$ ,  $n_\alpha$ ,  $\Delta$  i  $2V_\gamma$  lub  $2V_\alpha$  oznaczają maksymalne wartości tych parametrów dla danego minerału. Symbol  $2V$  oznacza kąt osi optycznych zawierający pierwszą dwusieczną, a znaczek przy symbolu  $2V$  („ $\gamma$ ” lub „ $\alpha$ ”) daje jednoznaczną informację o znaku optycznym minerału:

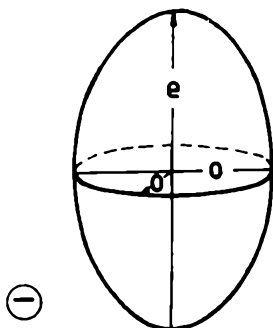
- dodatnim, gdy symbol kąta osi optycznych ma postać  $2V_\gamma$ ,
- ujemnym, gdy symbol kąta osi optycznych ma postać  $2V_\alpha$ .

Elipsoida Fresnela, czyli jednopowłokowa powierzchnia prędkości promieni dla kryształów optycznie jednoosiowych, ma postać elipsoidy obrotowej, której osią obrotu jest wektor  $e$  oznaczający prędkość promienia nadzwyczajnego, a wektor  $o$  oznaczający prędkość promienia zwyczajnego jest do niego prostopadły i stanowi promień przekroju kołowego tej elipsoidy (rys. 22). Oś obrotu elipsoidy Fresnela pokrywa się z osią optyczną kryształu jednoosiowego i z osią krystalograficzną  $Z$ .

a)



b)

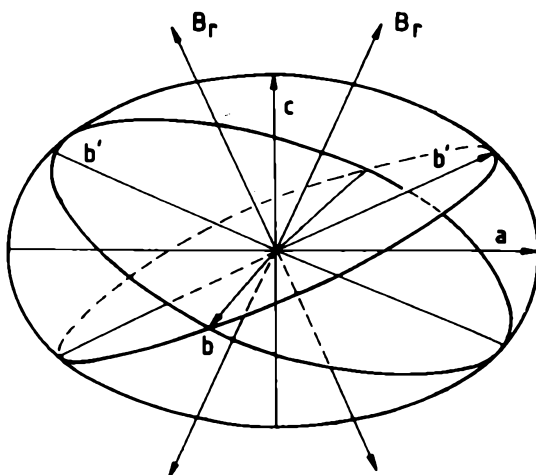


Rys. 22. Elipsoida Fresnela kryształu jednoosiowego dodatniego (a) i ujemnego (b)

Owaloida prędkości fali kryształów optycznie dwuosiowych ma postać owaloidy trójosiowej (rys. 25).

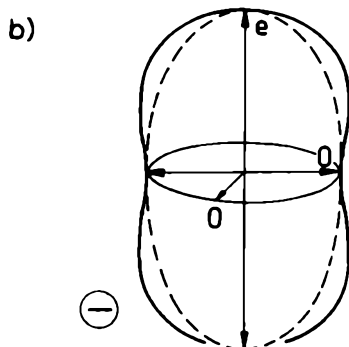
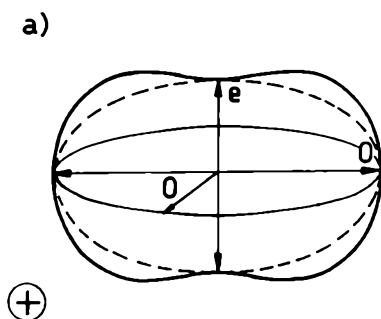
Elipsoida Fresnela kryształów optycznie dwuosiowych ma postać elipsoidy trójosiowej o półosiach (rys. 23):  $a > b > c$ . Dwa przekroje kołowe tej elipsoidy o promieniu  $b$  nie pokrywają się z przekrojami kołowymi indyktrysy tego kryształu, a normalne przekrojów kołowych tej elipsoidy (tzw. biradialne) nie są zgodne z kierunkami osi optycznych (tzw. binormalnymi).

Owaloida prędkości fali, czyli jednopowłokowa powierzchnia prędkości fali dla kryształów jednoosiowych ma postać owaloidy obrotowej. Półsią obrotu owaloidy jest wektor  $e = \frac{1}{n_e}$ , a wektor  $o = \frac{1}{n_o}$  leży w jej przekroju kołowym prostopadłym do wektora „ $e$ ”. Oś obrotu tej owaloidy pokrywa się z osią optyczną kryształu i osią krystalograficzną  $Z$  (rys. 24).

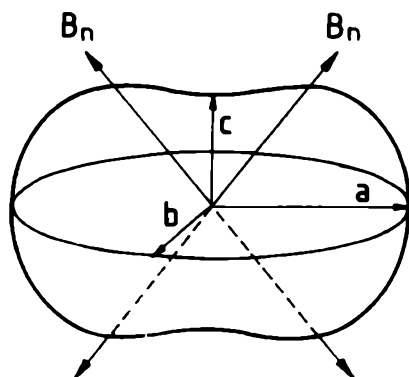


Rys. 23. Elipsoida Fresnela kryształu dwuosiowego:  
 $b'$  — przekroje kołowe elipsoidy,  $B_r$  — biradialne,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — półosie elipsoidy Fresnela





Rys. 24. Owaloidea prędkości fali kryształów jednoosiowych dodatnich (a) i ujemnych (b). Linia przerywana oznacza kształt elipsoidy Fresnela, z której wyprowadzono konstrukcyjnie owaloide.



Rys. 25. Owaloidea prędkości fali kryształów dwuosiowych:

a, b, c — półosie owaloidy trójosiowej,  $B_n$  — binormalne

W praktyce mineralogiczno-petrograficznej najbardziej przydatna jest indykatrysa, gdyż prędkość promieni i czoła fali określa się zwykle na podstawie pomiarów wartości współczynników załamania światła w kryształach, a konstrukcja Fresnela umożliwia dokonywanie wszelkich przekształceń powierzchni współczynnikowej w pozostale. Toteż znajomość właściwości indykatrysy i zasad konstrukcji Fresnela jest niezbędnym minimum w posługiwaniu się mikroskopem polaryzacyjnym.

## Symetria optyczna i geometryczna kryształów

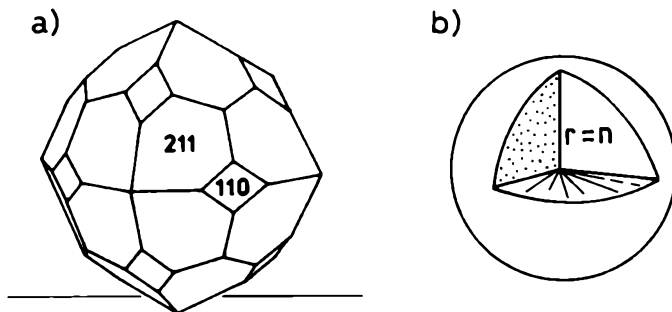
Symetria optyczna kryształów jest daleko większa od symetrii geometrycznej.

Kryształy z układu regularnego (izotropowe optycznie), których właściwości optyczne odwzorowuje kula, wyróżniają się nieskończoną liczbą elementów symetrii, podczas gdy liczba elementów symetrii geometrycznej jest ograniczona.

Kula obrazująca stan optyczny kryształu z układu regularnego może być wpisana w jego bryłę geometryczną w sposób dowolny (rys. 26;  $r = n = \text{const.}$ ). Pod względem optycznym minerały z układu regularnego różnią się:

- wartością współczynnika załamania światła,
- barwą,
- zdolnością odbijania światła (refleksyjnością),
- luminescencją,
- przezroczystością.

Kryształy z układu trygonalnego, tetragonalnego i heksagonalnego, czyli minerały anizotropowe jednoosiowe optycznie, których właściwości optyczne dobrze odwzorowuje elipsoida obrotowa (współczynniki załamania światła, prędkość promieni świetlnych) i owaloida obrotowa (prędkość fal świetlnych), wyróżniają się niższą symetrią cech optycznych w porównaniu z kryształami z układu regularnego, choć symetria tych cech jest większa od ich symetrii geometrycznej. Pod względem optycznym kryształy z tych układów krystalograficznych wyróżniają się obecnością uprzywilejowanego kierunku — osi



Rys. 26. Symetria geometryczna (a) i orientacja optyczna (b) kryształów z układu regularnego (na przykładzie kryształu granatu):  
 $n$  — współczynnik załamania światła

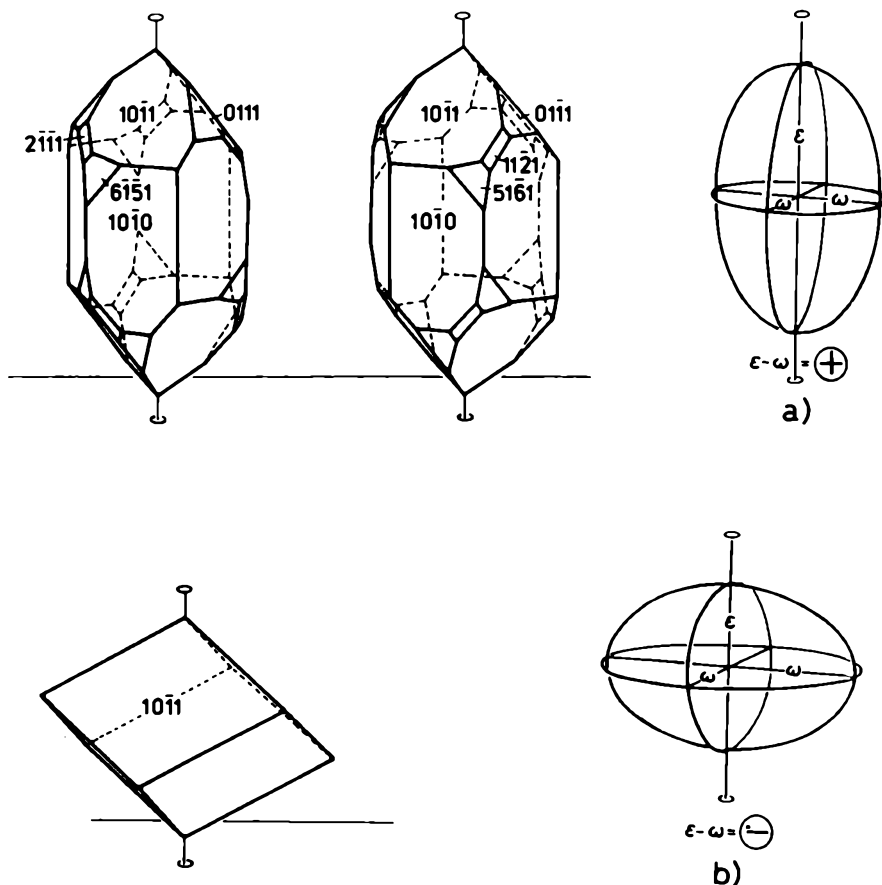
optycznej — który zawsze zlewa się z osią krystalograficzną  $Z$ . Kierunek ten jest osią symetrii rzędu nieskończenie wielkiego. Elipsoida obrotowa lub owaloida obrotowa kryształów z układu trygonalnego, tetragonalnego i heksagonalnego może być wpisana w bryłę geometryczną kryształu tylko w jeden sposób, tj. osią obrotu zgodnie z osią krystalograficzną  $Z$  (rys. 27, A, B, C). Pozostałe osie krystalograficzne kryształu leżą w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu elipsoidy, czyli w płaszczyźnie przekroju kołowego i mogą mieć wychodnie w ścianach lub krawędziach kryształu, bez uprzywilejowania optycznego któregoś z kierunków krystalograficznych występujących w tej płaszczyźnie. Określenie zatem przynależności minerału jednoosiowego optycznie do jednego z układów krystalograficznych (trygonalnego, tetragonalnego lub heksagonalnego) tylko na podstawie symetrii optycznej nie jest możliwe. Natomiast minerały jednoosiowe optycznie różnią się indywidualnymi cechami optycznymi:

- współczynnikami załamania światła,
- dwójłomnością,
- znakiem optycznym,
- pleochroizmem (dichroizmem),
- refleksyjnością,
- luminescencją,
- przezroczystością.

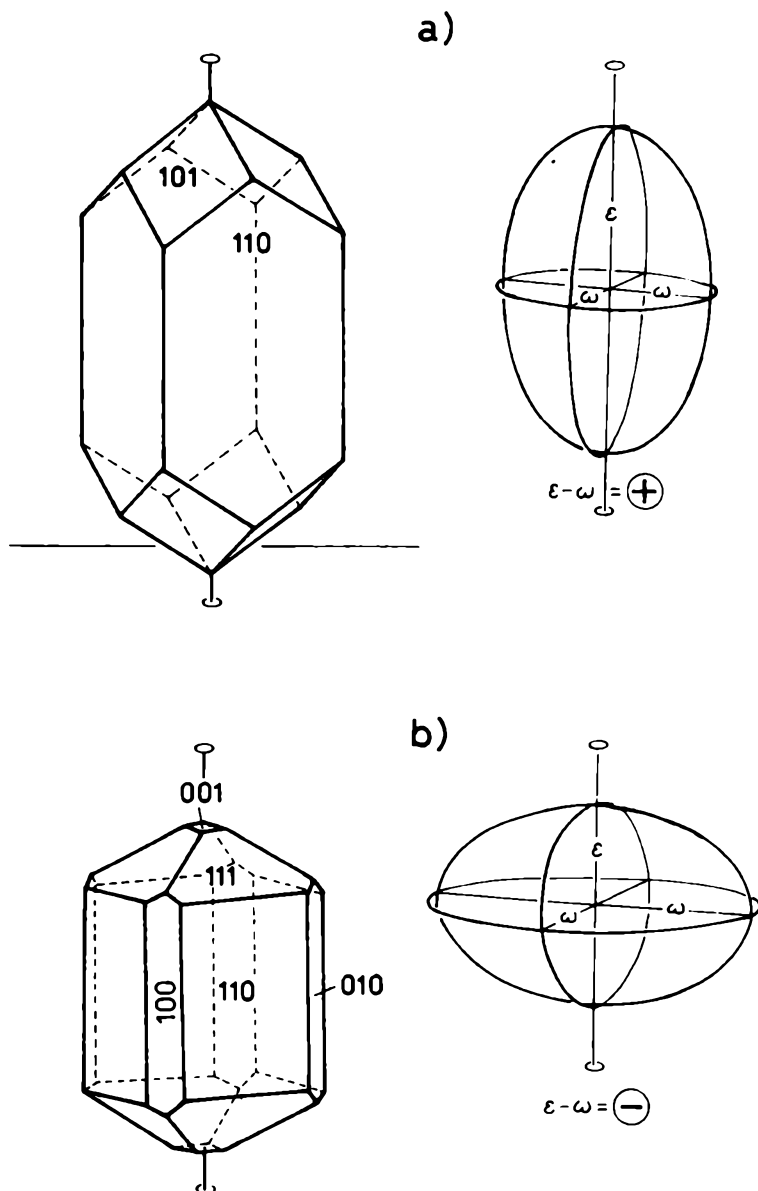
Kryształy z układu rombowego, jednoskośnego i trójskośnego, czyli kryształy anizotropowe dwuosiove optycznie, których właściwości optyczne dobrze odwzorowuje elipsoida trójosiowa (współczynniki załamania światła, prędkość promieni świetlnych) i owaloida trójosiowa (prędkość fal świetlnych) wyróżniają się spośród kryształów najniższą symetrią optyczną, choć jest ona większa od ich symetrii geometrycznej. Kryształy z wymienionych ukła-

dów wyróżniają się pod względem optycznym obecnością dwu symetrycznie położonych osi optycznych zawartych w płaszczyźnie osi optycznych. Elipsoida trójosiowa lub owaloida trójosiowa jest wpisana w bryłę geometryczną tych kryształów w różny sposób.

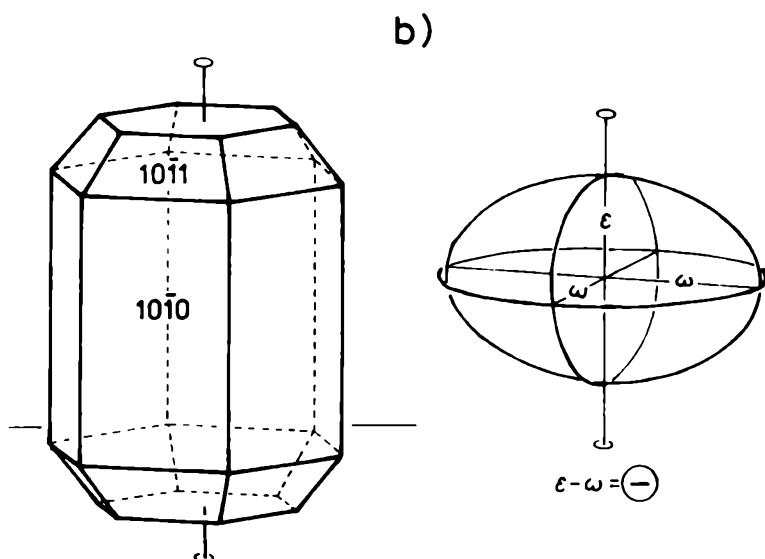
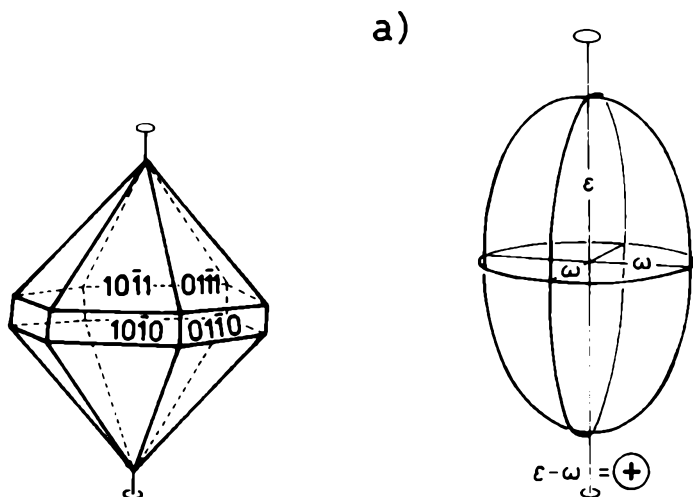
W kryształach z układu rombowego płaszczyzny symetrii optycznej zlewają się z płaszczyznami symetrii geometrycznej kryształu, a osie krystalograficzne pokrywają się z kierunkiem pierwszej i drugiej dwusiecznej oraz normalną optyczną (rys. 28). Stwarza to możliwość sześciu różnych orientacji bryły optycznej w stosunku do bryły geometrycznej kryształu zależnych od tego, który z wektorów optycznych zlewa się z którą osią krystalograficzną.



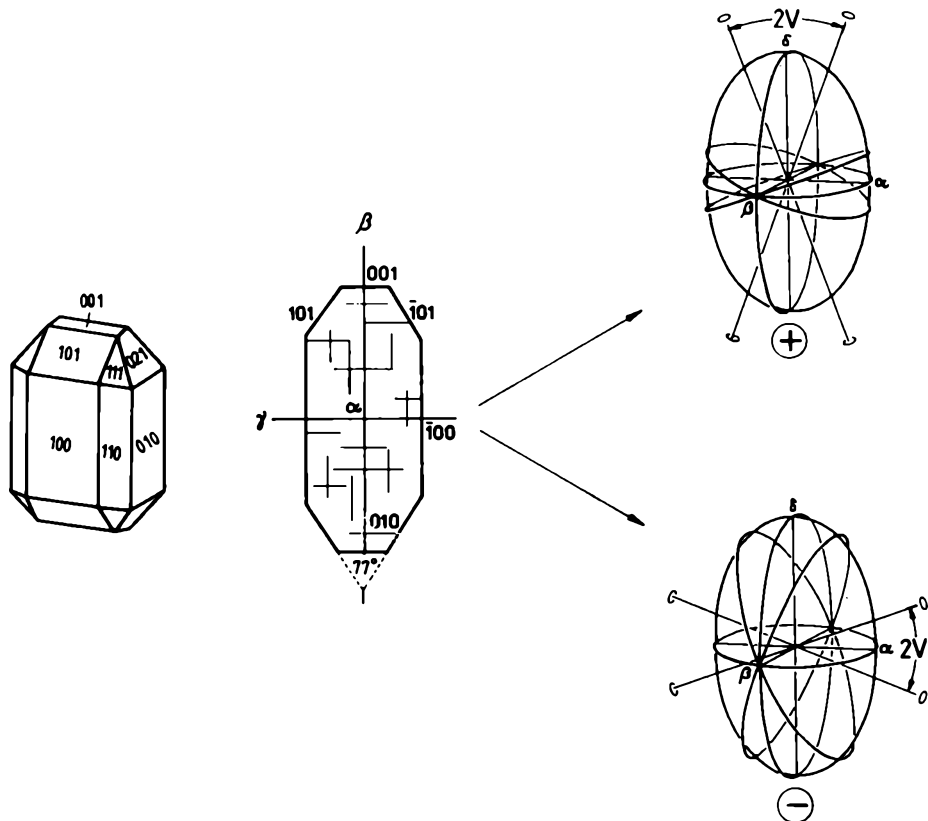
Rys. 27.A. Symetria geometryczna i optyczna kryształów z układu trygonalnego, optycznie jednoosiowych dodatnich (a — kwarc prawo- i lewoskrętny) i ujemnych (b — kalcyt)



Rys. 27.B. Symetria geometryczna i optyczna kryształów z układu tetragonalnego, optycznie jednoosiowych dodatnich (a — cyrkon) i ujemnych (b — wezuwian)



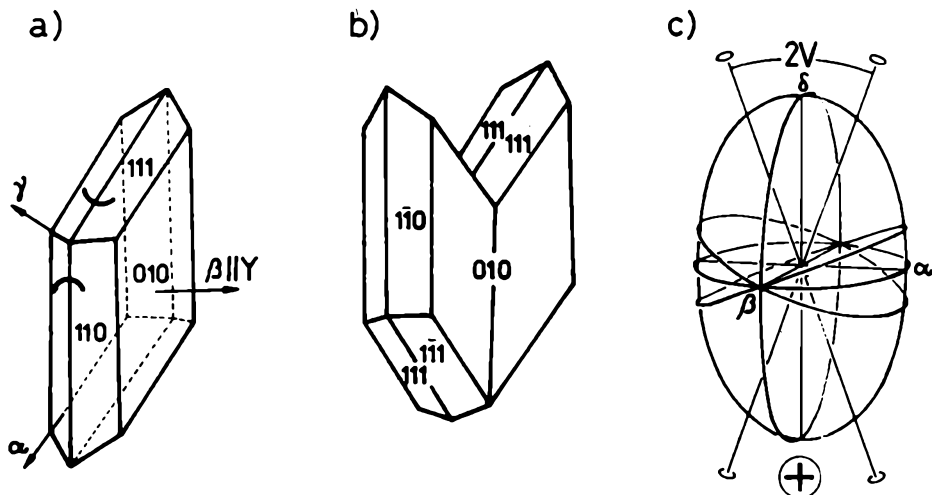
Rys. 27.C. Symetria geometryczna i optyczna kryształów z układu heksagonalnego, optycznie jednoosiowych dodatnich (a — kwarc pirogeniczny) i ujemnych (b — apatyt)



Rys. 28. Symetria geometryczna i optyczna kryształów z układu rombowego, optycznie dwuosiowych (na przykładzie izomorficznego szeregu oliwinów, od forsterytu — dodatniego optycznie — do fajalitu — ujemnego optycznie)

Płaszczyzna osi optycznych może być zorientowana trojako, tj. równoległe do płaszczyzny 001, 010 lub 100. Przynależność do jednej z tych grup jest cechą indywidualną kryształów krystalizujących w układzie rombowym.

W kryształach jednoskośnych tylko jeden z głównych kierunków optycznych — pierwsza dwusieczna, druga dwusieczna lub normalna optyczna — zlewa się z osią krystalograficzną  $Y$ . Płaszczyzną osi optycznych zatem jest płaszczyzna 010 lub do niej prostopadła (rys. 29). Pozostałe wektory optyczne leżą w płaszczyźnie znaczonej przez osie krystalograficzne  $X$  i  $Z$ , przy czym zawarte w tej płaszczyźnie główne kierunki optyczne nie zlewają się z kierunkami osi krystalograficznych. Stwarza to możliwość trzech różnych orientacji bryły optycznej w stosunku do bryły geometrycznej kryształu, zależnie od tego, który z kierunków optycznych pokrywa się z osią krystalograficzną  $Y$ . Przynależność do jednej z tych grup jest indywidualną cechą kryształów jednoskośnych.



Rys. 29. Symetria geometryczna i optyczna kryształów z układu jednoskośnego (na przykładzie gipsu — optycznie dodatni):

a) kryształ gipsu, b) gips zbliżniaczony wg (100), c) indyktrysa

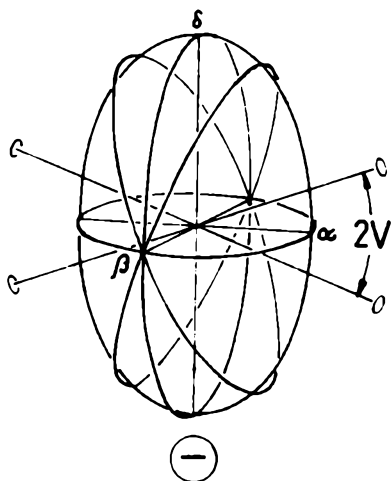
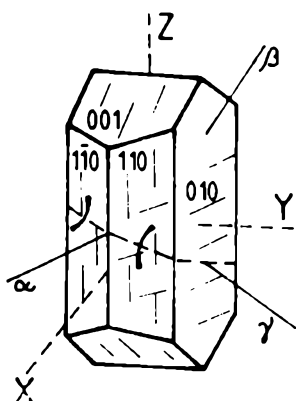
W kryształach trójskośnych położenie bryły optycznej jest niezależne od kierunków krystalograficznych, ale ściśle określone dla poszczególnych minerałów trójskośnych, różniących się nawet niewiele składem chemicznym. W kryształach tych główne kierunki optyczne nie zgadzają się z osiami krystalograficznymi (rys. 30). Położenie indyktrysy w kryształ trójskośnym jest jego indywidualną cechą.

Ponadto, poszczególne minerały dwuosiowe optycznie różnią się indywidualnymi cechami optycznymi:

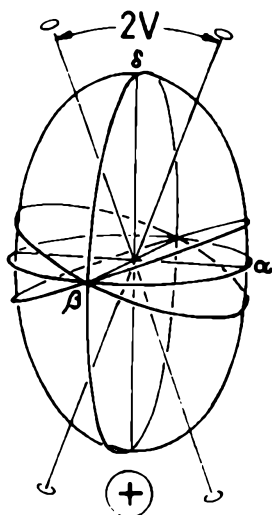
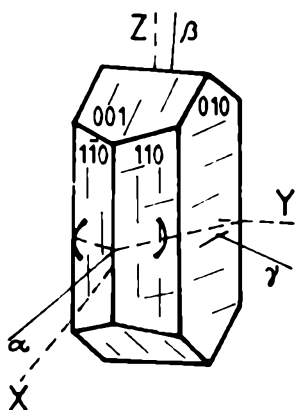
- wartością współczynników załamania światła,
- dwójłomnością,
- znakiem optycznym,
- pleochroizmem,
- kątem osi optycznych,
- refleksyjnością,
- dyspersją,
- luminescencją,
- sposobem i kątem wygaszania światła w różnych przekrojach,
- przezroczystością.



a)



b)



Rys. 30. Symetria geometryczna i optyczna kryształów z układu trójskośnego — na przykładzie plagioklazów: albitu wysokotemperaturowego (a), albitu niskotemperaturowego (b)

## Współczynnik załamania światła i struktura kryształów

Budowa wewnętrzna kryształu polega na prawidłowym rozmieszczeniu atomów, jonów lub cząsteczek w węzłach jego sieci przestrzennej. Wielościenne postać kryształu jest zewnętrznym odbiciem jego struktury sieciowej. Naturalne ściany kryształu są zawsze równoległe do płaszczyzn sieciowych, a proste sieciowe są krawędziami kryształu. Struktura sieciowa kryształu powoduje, że ich właściwości fizyczne (w tym i optyczne) są niejednokrotnie zależne od kierunku.

Klasyfikację struktur kryształów można przeprowadzić w różny sposób, przyjmując jedno z kryteriów:

- skład chemiczny,
- rodzaj wiązania chemicznego,
- liczbę koordynacyjną,
- figurę koordynacyjną.

Najczęściej stosowanym kryterium jest rodzaj wiązania chemicznego. Z tego punktu widzenia wyróżnia się struktury:

- homodesmiczne, w których wszystkie atomy są ze sobą połączone za pomocą wiązań tego samego rodzaju (np. metale rodzime — struktury metaliczne, diament — struktura atomowa, halit — struktura jonowa, zestalone gazy szlachetne — struktura molekularna); kryształy o strukturze metalicznej wykazują specyficzne właściwości optyczne (np. nieprzejrzystość, metaliczny połysk) z uwagi na obecność gazu elektronowego; kryształy o strukturze atomowej (kowalencyjnej) wykazują zazwyczaj

wysokie wartości współczynników załamania światła, podczas gdy kryształy o strukturze jonowej charakteryzuje stosunkowo niska wartość współczynników załamania światła; natomiast kryształy o strukturze molekularnej mają wyraźnie zróżnicowane wartości współczynników załamania światła,

- heterodesmiczne, w których istnieją równocześnie różne wiązania (np. w kalcycie — atomowo-jonowe, w kryształach związków organicznych — atomowo-cząsteczkowe).

Z mineralogicznego punktu widzenia istotne znaczenie ma konfiguracja atomów wchodzących w strukturę kryształu. Na tej podstawie wyróżnia się struktury krzemianów:

- szkieletowe (np. struktura skaleni, skaleniewiczów, zeolitów, skapolitów, kwarcu),
- warstwowe (np. struktura łuszczyków, chlorytów, minerałów ilastych),
- łańcuchowe (np. struktura piroksenów, epidotów),
- wstęgowe (np. struktura amfiboli),
- pierścieniowe (np. struktura berylu, wollastonitu),
- wyspowe (np. struktura oliwinów, granatów).

Krzemiany i glinokrzemiany, które są głównymi składnikami litosfery ziemskiej, wykazują zależność wartości współczynników załamania światła od sposobu wiązania się tetraedrów  $(\text{SiO}_4)^{-4}$ . Największe wartości współczynników załamania światła wykazują krzemiany wyspowe (oliwiny  $n \approx 1,65$ — $1,75$ ; granaty  $n \approx 1,70$ — $2,00$ ). Nieco niższe wartości współczynników załamania światła mają krzemiany i glinokrzemiany łańcuchowe (pirokseny  $n \approx 1,70$ ; epidoty  $n \approx 1,70$ ), wstęgowe (amfibole  $n \approx 1,65$ ), pierścieniowe (beryl  $n \approx 1,58$ ; wollastonit  $n \approx 1,63$ ). W glinokrzemianach warstwowych współczynniki załamania światła są jeszcze mniejsze (łuszczyki  $n \approx 1,57$ ; chloryty  $n \approx 1,58$ ; kaolinit  $n \approx 1,56$ ; montmorillonit  $n \approx 1,53$ ). W glinokrzemianach i krzemianach szkieletowych (przestrzennych) współczynniki załamania światła są najmniejsze (skalenie  $n \approx 1,53$ ; skaleniewicz  $n \approx 1,49$ ; zeolity  $n \approx 1,49$ ; skapolity  $n \approx 1,54$ ). Stopniowa zmiana wartości współczynników załamania światła w krzemianach i glinokrzemianach jest skorelowana więc ze zmianą stosunku atomów tlenu do atomów krzemu i glinu w jonach kompleksowych tych minerałów. Najwyższy stosunek, wynoszący 4:1, występuje w krzemianach wyspowych i stopniowo maleje w krzemianach łańcuchowych, pierścieniowych, wstęgowych i warstwowych, by osiągnąć minimum (2:1) w krzemianach szkieletowych.

Budowa anionu krzemowotlenowego znajduje często odzwierciedlenie w cechach zewnętrznych minerałów (łupliwość, pokrój). Ściany realnych kryształów zwykle są równoległe do płaszczyzn sieciowych obsadzonych najgęściej przez atomy. Są to przeważnie ściany o niskich wskaźnikach. Również najlepsza łupliwość kryształu zachodzi zwykle zgodnie z płaszczyznami sie-

ciowymi o największym nasyceniu atomami, gdyż w kierunku prostopadłym odległość między atomami jest znacznie większa, a siły wiążące je słabsze. Światło, wędrując w kierunku zgodnym z gęsto obsadzoną atomami płaszczyzną sieciową napotyka większy „opór” środowiska (ma mniejszą prędkość, a tym samym większą wartość współczynnika załamania) niż podczas przemieszczania się prostopadle do tej płaszczyzny. Dlatego też kryształy optycznie jednoosiowe wydłużone zgodnie z osią  $Z$  i wykazujące łupliwość równoległą do ścian słupa na ogół są optycznie dodatnie ( $n_e > n_o$ ), a kryształy wykazujące najlepszą łupliwość równoległą do ścian dwuścianu podstawowego są przeważnie ujemne optycznie ( $n_e < n_o$ ). Podobna prawidłowość występuje w kryształach dwuosiowych optycznie.

Wartości współczynników załamania światła kryształów zależą w większym stopniu od wielkości anionów niż od wielkości kationów, ponieważ polaryzowalność anionów jest większa i wartość współczynnika załamania zwiększa się wraz ze zwiększeniem wielkości anionu. Prawidłowość ta jest szczególnie wyrazista w związkach tworzących struktury jonowe (np. chlorki, bromki, jodki, fluorki). Wartość współczynników załamania światła w takich kryształach zależy także od stopnia wypełnienia przestrzeni przez jony. Stopień ten wyraża się stosunkiem objętości własnej jonów do objętości komórki elementarnej. Wartość współczynników załamania światła wzrasta wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia przestrzeni przez jony. Niektóre jony mogą ponadnormatywnie podwyższać wartość współczynników załamania światła (np.  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ ) lub ją obniżać (np.  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$ ). Polimorficzne odmiany określonego związku (np.  $\text{TiO}_2$  — anataz, brookit, rutil;  $\text{CaCO}_3$  — kalcyt, aragonit,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  — andaluzyt, syllibmanit, dysten) wykazują wzrost wartości współczynników załamania światła wraz ze wzrostem gęstości spowodowanej ściślejszym upakowaniem jonów w komórce elementarnej.

## Dyspersja światła w kryształach

Dyspersja światła polega na uzależnieniu prędkości rozprzestrzeniania się fal świetlnych w ośrodku od ich długości, czyli barwy monochromatycznej. Jeżeli w ośrodku fale dłuższe przemieszczają się z większą prędkością niż fale krótsze, to zachodzi normalna dyspersja fal elektromagnetycznych. W sytuacji odwrotnej, gdy fale dłuższe propagują się z mniejszą prędkością, mamy do czynienia z anormalną dyspersją fal elektromagnetycznych. Dyspersja światła zwykle jest wyrażana zależnością współczynnika załamania światła od długości fali elektromagnetycznej ( $n = f(\lambda)$ ), gdyż współczynnik załamania światła danego ośrodka jest bezpośrednim wynikiem porównania prędkości fali elektromagnetycznej w próżni i badanym ośrodku. Już D. F. J. Arago (1786—1853) wykazał, że dyspersja światła w próżni nie istnieje, tzn. fale elektromagnetyczne widma widzialnego rozchodzą się w próżni ze stałą prędkością około 300 tys. km/s.

Jako pierwszy dyspersję światła zbadał I. Newton w 1672 roku, obserwując widmo światła białego otrzymane za pomocą pryzmatu.

Ośrodki, w których występuje dyspersja, są nazywane dyspersyjnymi. Prawie wszystkie ośrodki przezroczyste wykazują dyspersję normalną. W ośrodkach nieprzezroczystych zachodzi dyspersja anormalna. Jednak wiele ośrodków przezroczystych ma dyspersję anormalną w nadfiolecie i podczerwieni, w których zakresie stają się ośrodkami nieprzezroczystymi. Oprócz normalnej i anormalnej dyspersji światła spotyka się też zjawisko dyspersji obrotowej światła. Polega ono na zmianie kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w zależności od użytej długości fali elektromagnetycznej.

Kryształy izotropowe wykazują tylko dyspersję współczynnika załamania światła.

Kryształy optycznie jednoosiowe zaś wykazują dyspersję:

- współczynników załamania światła,
- dwójłomności.

Miarą dyspersji dwójłomności kryształów anizotropowych jest różnica dwójłomności określonej z użyciem światła niebieskiego (linia  $F$  Fraunhofera w widmie światła słonecznego) i światła pomarańczowego (linia  $C$  Fraunhofera), przybierająca postać  $\Delta_{nr} - \Delta_{nc}$ . W kryształach jednoosiowych optyczne położenie osi optycznej nie zmienia się dla różnych długości fal użytego światła i zawsze jest zgodne z osią krystalograficzną  $Z$ .

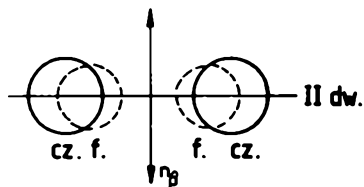
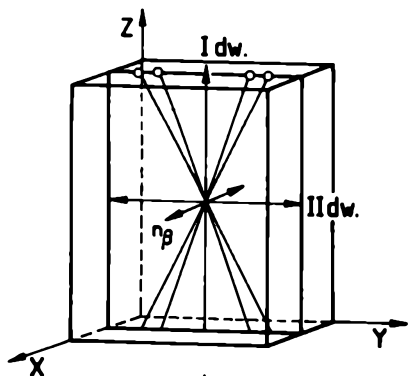
Kryształy dwuosiowe wykazują dyspersję:

- współczynników załamania światła,
- dwójłomności,
- kąta osi optycznych,
- płaszczyzny osi optycznych,
- asymetryczną,
- kąta wygaszania,
- refleksyjności.

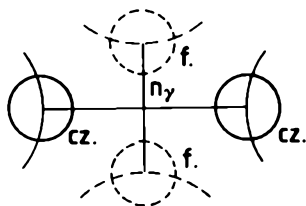
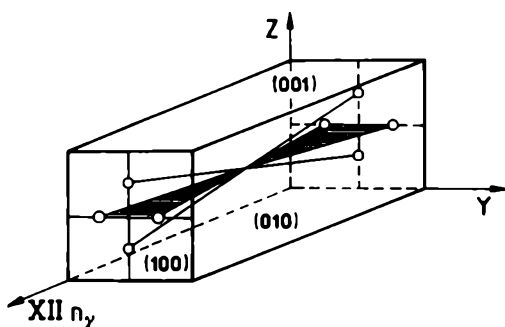
W kryształach krystalizujących w układzie rombowym występuje dyspersja współczynników załamania światła, dwójłomności, kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych. Dyspersje kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych często są ujmowane pod wspólną nazwą dyspersji rombowej. Wyróżnia się dyspersję rombową symetryczną, gdy zachodzi dyspersja kąta osi optycznych (np. w aragonicie, rys. 31) i dyspersję rombową skrzyżowaną, gdy zachodzi dyspersja płaszczyzny osi optycznych (np. w brookicie, rys. 32).

W kryształach jednoskośnych występuje dyspersja współczynników załamania światła, dwójłomności, kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych. Dyspersje kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych często określa się wspólną nazwą dyspersji jednoskośnej. Wyróżnia się dyspersję jednoskośną:

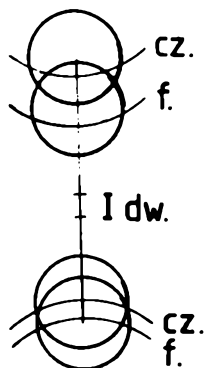
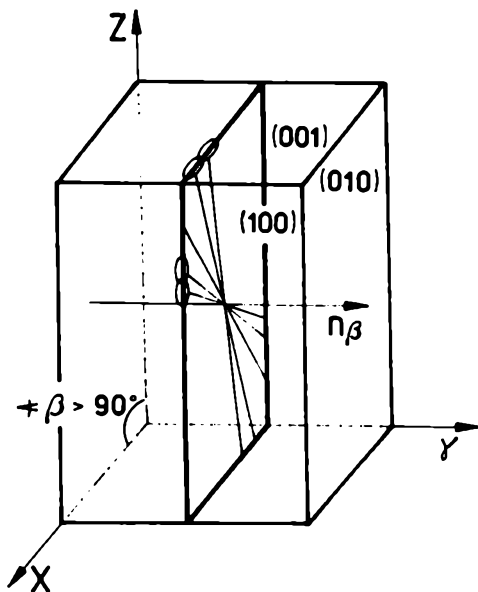
- pochyloną, gdy zachodzi dyspersja kąta osi optycznych (np. w gipsie, augicie, epidocie, rys. 33),
- skrzyżowaną, gdy zachodzi dyspersja kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych (np. w boraksie, heulandycie, rys. 34); dotyczy kryształów jednoskośnych, w których oś  $Y$  zlewa się z I dwusieczną indykatrysy,
- poziomą, gdy zachodzi dyspersja kąta osi optycznych i płaszczyzny osi optycznych (np. w adularze, rys. 35); dotyczy kryształów jednoskośnych, których oś krystalograficzna  $Y$  zlewa się z II dwusieczną indykatrysy.



Rys. 31. Dyspersja rombowa symetryczna



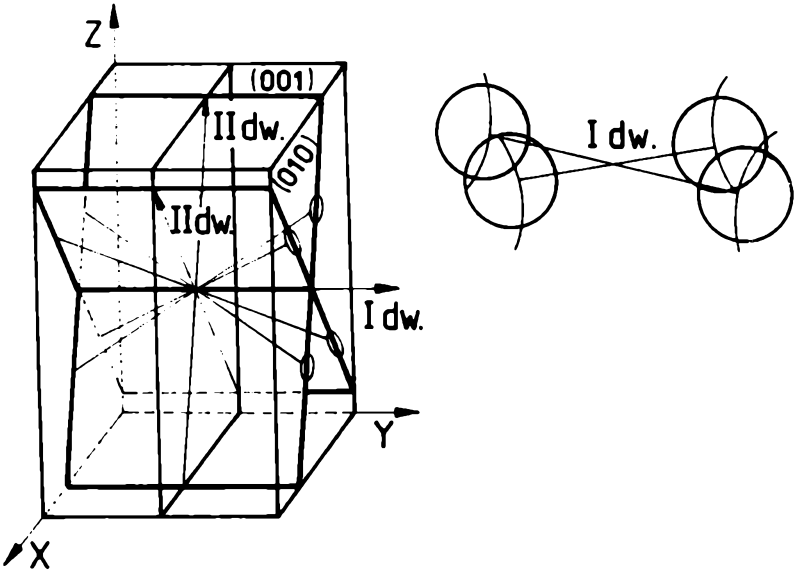
Rys. 32. Dyspersja rombowa skrzyżowana



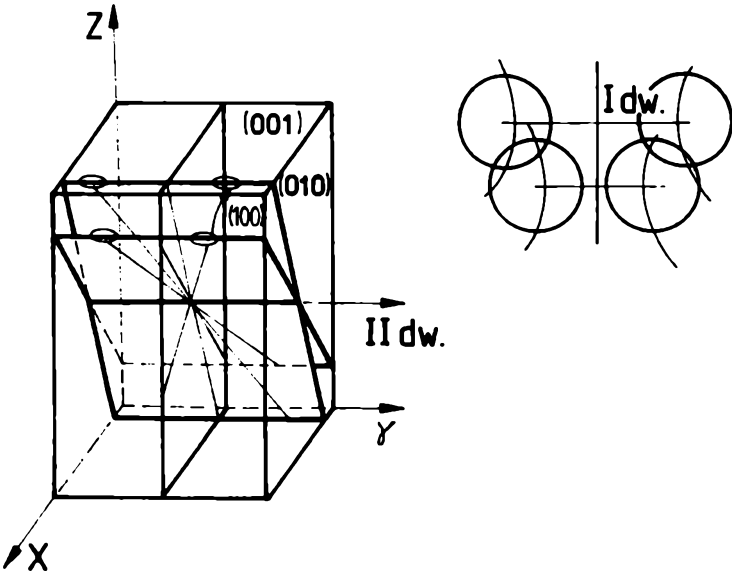
Rys. 33. Dyspersja jednoskośna pochylona

W kryształach trójskośnych położenie indykatrysy jest niezależne od kierunków krystalograficznych, choć dla różnych długości fal elektromagnetycznych i kryształów ściśle określone. W kryształach trójskośnych występuje dyspersja wszystkich elementów symetrii optycznej, która nie jest

regulowana określonymi związkami ogólnymi. Toteż przyjęło się nazywać ją dyspersją asymetryczną (np. oligoklaz, albit, rys. 36).

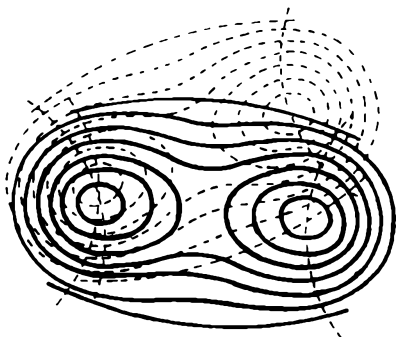


Rys. 34. Dyspersja jednoskośna skrzyżowana



Rys. 35. Dyspersja jednoskośna pozioma





Rys. 36. Dyspersja asymetryczna  
(w przekroju  $\perp$  do I dwusiecznej)

W kryształach jednoskośnych i trójskośnych w wyniku zmiany położenia osi idnykatrysy w geometrycznej bryle kryształu wraz ze zmianą długości fali użytego światła może wystąpić dyspersja dwusiecznych, co pod mikroskopem ujawnia się często brakiem całkowitego wygaszenia światła podczas przechodzenia do pozycji wygaszenia przekroju i pojawieniem się w strefie przejściowej barwy interferencyjnej brunatnawej lub niebieskawej (gdy używane jest światło białe) lub też różnym kątem

wygaszenia tego samego przekroju, gdy kolejno są używane coraz to inne długości fal świetlnych (różne barwy światła monochromatycznego).

Zmiana wartości refleksyjności (patrz rozdz. 17) w zależności od długości fali użytego światła w kryształach anizotropowych nosi nazwę dyspersji refleksyjności, czyli dyspersji zdolności odbicia światła. Ponieważ przebieg tej zależności w kryształach często ma charakter bardzo skomplikowany, więc na potrzeby badań w świetle odbitym chętniej posługujemy się wynikami badań empirycznych uzyskiwanych z zastosowaniem światła monochromatycznego o długości fal 470, 546, 589 lub 650 nm.

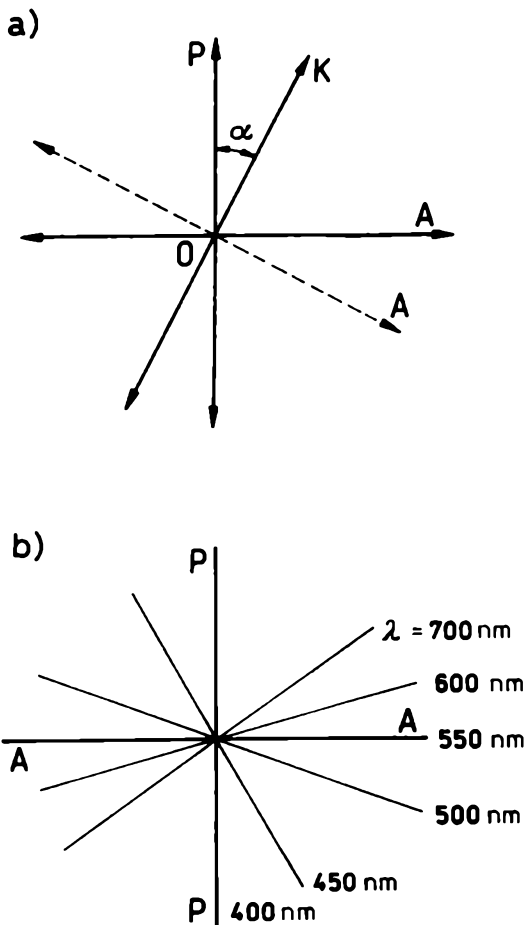
## Kryształy optycznie aktywne

Niektóre kryształy zalicza się do grupy optycznie aktywnych (optycznie czynnych). Są to kryształy wykazujące zdolność skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła o pewien kąt (rys. 37). Wyróżnia się wśród nich kryształy:

- prawoskrętne, skręcające płaszczyznę polaryzacji światła o pewien kąt w prawo i oznaczane jako dodatnie („+”),
- lewoskrętne, skręcające płaszczyznę polaryzacji światła o pewien kąt w lewo i oznaczane jako ujemne („−”).

Mikroskopowo, ze względu na niewielką grubość preparatu mikroskopowego (0,02—0,03 mm), efekt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła uchodzi uwadze obserwatora, gdyż kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji jest proporcjonalny do grubości preparatu mikroskopowego. Zjawisko to uwidacznia się dopiero w grubszych preparatach, o grubości rzędu milimetra i więcej. Stosunek wielkości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła do grubości preparatu mikroskopowego, wyrażonej w milimetrach, nazywamy skręceniem właściwym. Jest to cecha indywidualna minerałów, która nie ma znaczenia identyfikacyjnego w petrograficznej praktyce mikroskopowej.

Aktywność optyczna jest właściwością licznych związków chemicznych, szczególnie organicznych. Mogą one występować w stanie stałym (w tym krystalicznym), ciekłym i w roztworach. Właściwość ta jest szczególnie pospolita w produktach naturalnych (np. cukrach, aminokwasach, alkaloidach), a została wykryta przez D. F. J. Arago w kryształach kwarcu w 1811 roku.



Rys. 37. Skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła:

a) w świetle monochromatycznym ( $\alpha$  — kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła), b) w świetle o różnej długości fali ( $\lambda$  — długości fal elektromagnetycznych użytego światła)

Zjawisko skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła zachodzi w kryształach anizotropowych tylko w kierunku osi optycznej i w kierunkach do niej zbliżonych. Przykładowo, w kwarcu promienie światła odchylone od osi optycznej więcej niż o  $24^\circ$  nie ulegają już skręceniu. Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła przez kryształy optycznie aktywne zależy także od długości fali użytego światła (tzw. dyspersja obrotowa światła). Dla niektórych substancji skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła nadfioletowego jest kilkanaście razy większe od skręcenia płaszczyzny polaryzacji w świetle czerwonym.

Wśród minerałów największe skręcenie właściwe wykazują:

- cynober  $\text{HgS}$ ,  $325^\circ/\text{mm}$  (w świetle czerwonym),
- kwarc  $\text{SiO}_2$ ,  $16^\circ/\text{mm}$  (w świetle czerwonym).

Minerały dwuosiove optycznie nie dostarczyły dotychczas przykładu skręcenia płaszczyzny polaryzacji, choć zjawisko to jest pospolite w kryształach dwuosiowych substancji organicznych (np. kwas winowy, cukier trzcinowy, sól Seignetta). Także niektóre kryształy z układu regularnego wykazują zdolność skręcania płaszczyzny polaryzacji światła, przy czym zdolność ta jest w nich niezależna od kierunku. Zjawisko tłumaczy się kołową polaryzacją światła przez kryształy izotropowe, optycznie aktywne, przy czym prędkość każdego z powstałych drgań kołowych różni się i w miarę przenikania światła przez płytkę krystaliczną powoduje wzrost kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła. W konsekwencji tego należy przyjąć, że niektóre kryształy z układu regularnego optycznie aktywne są dwójłomne, choć jest to polaryzacja kołowa, a nie liniowa.

Zjawisko aktywności optycznej niektórych minerałów pozostaje w bezpośrednim związku z ich strukturą. Już w ubiegłym wieku podejrzewano, że aktywność optyczną niektórych kryształów powoduje ich śrubowa struktura. Okazało się, że kryształy skręcające płaszczyznę polaryzacji światła w prawo („+”) mają osie symetrii śrubowej prawe, a kryształy skręcające płaszczyznę polaryzacji w lewo („—”) mają osie symetrii śrubowej lewe. Gdy w kryształach występują jednocześnie prawe i lewe śrubowe osie symetrii, zjawisko skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła nie występuje.

Aktywność optyczną cieczy i roztworów tłumaczy się asymetryczną budową tworzących je cząstek.

## Anomalie optyczne

Odstępstwa od przewidzianego teorią przebiegu zjawisk optycznych w kryształach o określonym poziomie symetrii geometrycznej i z zastosowaniem światła spolaryzowanego liniowo określa się mianem anomalii optycznych.

Ciała optycznie izotropowe mogą stać się dwójłomne wskutek działania różnych czynników wytwarzających w nich anizotropię (tzw. dwójłomność wymuszoną). Zjawisko to zostało zauważone w 1813 roku przez T. J. Seebecka i zbadane dokładniej przez D. Brewstera w 1816 roku (z wykorzystaniem szkła).

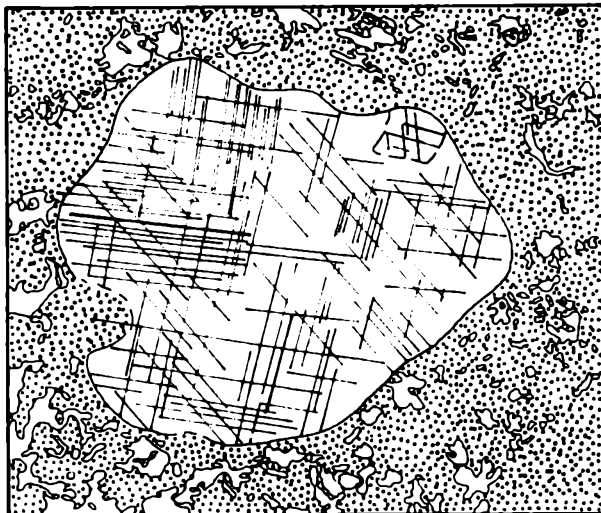
Dwójłomność wymuszona różnych substancji izotropowych (w tym i kryształów izotropowych) może być wywołana przez:

- odkształcenia (np. deformacje mechaniczne),
- naprężenia (np. wskutek nierównomiernego ogrzewania lub studzenia, szokiem termicznym, szokiem ciśnieniowym),
- zmiany wewnętrznej symetrii geometrycznej kryształu z zachowaniem jego postaci zewnętrznej (np. kryształy naśladowcze, czyli mimetyczne),
- wpływ zewnętrznego pola elektrycznego.

Wywarcie nacisku, obciążenie lub rozciągnięcie ciała izotropowego powoduje przekształcenie go w ciało optycznie jednoosiowe, przy czym kierunek osi optycznej zlewa się z kierunkiem wywartego nacisku, obciążenia czy rozciągnięcia, a powstała różnica współczynników załamania światła ( $\Delta$ ) jest proporcjonalna do zaistniałego odkształcenia. Analogiczny efekt powstaje w wyniku naprężeń wywołanych w ciele izotropowym przez zakłócenie

struktury wewnętrznej. Zjawisko to jest dość częste w minerałach izotropowych tworzących szeregi izomorficzne (np. granaty), gdy objętości jonów zastępujących się wzajemnie w strukturze kryształu różnią się znacząco. Podobny efekt optyczny powstaje na skutek zakłócenia wzrostu kryształu (defekty wzrostu).

Dość pospolitym zjawiskiem w kryształach regularnych jest załamywanie się wyższymetrycznej struktury geometrycznej minerału i przejście w niższymetryczną z powodu zmiany temperatury, przy czym przemiana ta jest odwracalna (enancjotropowa) i spontaniczna. Mikroskopowo ujawnia się to tzw. splotem mimetycznym lub prążkowaniem mimetycznym (rys. 38).



Rys. 38. Splot mimetyczny leucytu (pow. 80 $\times$ , polaroidy skrzyżowane)

Przykładu dostarcza regularny leucyt  $\alpha$ , który w temperaturze około 620°—560°C przechodzi w leucyt  $\beta$ , pseudoregularny o tetragonalnej, rombowej lub jednoskośnej symetrii wewnętrznej. Podobne właściwości ujawnia także filipsyt, perowskit, boracyt, analcym itp.

Dwójłomność wymuszona może powstawać w izotropowych ciałach stałych, ciekłych i gazowych pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego (zjawisko Kerra), przy czym powstała dwójłomność jest proporcjonalna do kwadratu natężenia przyłożonego pola elektrycznego i zależy od rodzaju materiału, długości fali światła oraz temperatury (tzw. stała Kerra) zastosowanych w eksperymencie.

Anomalie optyczne zostały wykorzystane przez elastooptykę do doświadczalnego wyznaczania wielkości naprężeń w przezroczystych, bezpostaciowych ciałach izotropowych (w szkłe, celulozie, żelatynie, żywicach akry-

lowych itp.), wykazujących pod wpływem odkształceń i naprężeń dwójłomność wymuszoną. Wywołana tak anizotropia może być w prosty sposób mierzona metodami optycznymi, pozwalając wyznaczać naprężenia w dowolnym punkcie badanego obiektu. Badania elastooptyczne okazały się niezwykle użyteczne do określania naprężeń w modelowych konstrukcjach o skomplikowanym kształcie, gdzie obliczenia teoretyczne są nader pracochłonne lub wręcz niewykonalne. Metoda ta może być wykorzystywana także do wykrywania naprężeń szkodliwych lub niepożądanych.

Na osobną uwagę zasługują tzw. ciecze krystaliczne, czyli ciecze optycznie anizotropowe. Charakteryzują się one uporządkowanym ułożeniem cząsteczek, które je tworzą. Uporządkowanie to powoduje wytworzenie się dwójłomności cieczy. Ciecze krystaliczne mają właściwości optyczne kryształów anizotropowych jednoosiowych. W ściśle określonej temperaturze ciecz krystaliczna przekształca się w kryształ rzeczywisty lub w zwykłą ciecz, tj. substancję optycznie izotropową. Dotychczas stwierdzono około dwóch tysięcy różnych cieczy krystalicznych. Są to ciała ciekłe, organiczne (np. olejan amonu, octan cholesterolu), przybierające w odpowiednich warunkach postać wielościannu o zaokrąglonych ścianach i krawędziach. Ciekłe kryształy zetknięte ze sobą łączą się jak krople cieczy.

Anomalie optyczne występują także w ciałach optycznie anizotropowych. Kryształy jednoosiowe poddane odkształceniom lub naprężeniom w kierunku skośnym lub prostopadłym do osi optycznej stają się optycznie dwuosiowe. Mogą także ulegać zaburzeniom wewnętrznym (np. struktury kryształu). Zaburzenia te przejawiają się mikroskopowo falistym lub plamistym wygaszaniem światła spolaryzowanego przez kryształ pozornie jednorodny lub rzadziej spotykaną sektorowością nieregularną. Spotykane w minerałach blaszkowych deformacje plastyczne pakietów skutkują optycznie zaburzeniami w sposobie wygaszania światła spolaryzowanego.

W kryształach pierwotnie anizotropowych może dochodzić do izotropizacji z wytworzeniem się w ostatecznym stadium przemian tzw. stanu metamiktycznego. Stan ten jest zwykle wywoływany destrukcją sieci przestrzennej kryształu promieniowaniem (głównie  $\alpha$ ) powstającym w wyniku samorzutnego rozpadu pierwiastków promieniotwórczych, których atomy występują w sieci krystalicznej minerału. Źródłem promieniowania są rozpadające się samorzutnie atomy uranu i toru, rzadziej innych pierwiastków promieniotwórczych. Stan metamiktyczny przypomina stan szklisty lub koloidalny. Mineral ulegający wtórnej izotropizacji zmniejsza gęstość właściwą, współczynniki załamania światła, dwójłomność, pleochroizm, adsorbując jednocześnie cząsteczki  $H_2O$ . Przez ogrzanie zizotropizowanego minerału można zregenerować jego strukturę krystaliczną, przy czym wydziela się wówczas pewna ilość energii wyrażająca się efektem egzotermicznym na derywatogramie zizotropizowanego minerału.

Zjawisko wtórnej izotropizacji minerałów skałotwórczych zachodzi najczęściej w cyrkonie (zizotropizowany jest nazywany malakonem lub cyrtolitem, gdy zawiera większą ilość  $H_2O$ ) i allanicie (ortycie), czyli odmianie epidotu o dużej zawartości pierwiastków ziem rzadkich (ceru, lantanu i prazeodymu). Zjawisko wtórnej izotropizacji jest dość częste w minerałach bogatych w uran (z wyjątkiem uraninitu) i tor (z wyjątkiem thorianitu). Uraninit i thorianit, mimo że są minerałami o największej zawartości uranu, nie ulegają metamiktyzacji, gdyż mają bardzo prostą strukturę i dużą jonowość wiązań (współczynnik jonowości 0,7), co wyraża się na przykład wysoką temperaturą topnienia  $UO_2$ , wynoszącą  $2880^{\circ}C$ .



## Reakcje fotochemiczne w kryształach

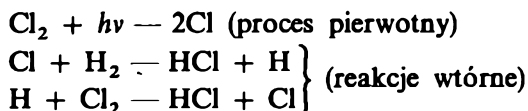
Zachodzące pod wpływem energii promieni świetlnych (widzialnych, nadfioletowych i podczerwonych) reakcje chemiczne nazywa się reakcjami fotochemicznymi.

W większości reakcji fotochemicznych można wyróżnić:

- proces pierwotny, spowodowany bezpośrednim działaniem światła,
- wtórne reakcje chemiczne, zachodzące już bez udziału światła.

Proces pierwotny polega na pochłonięciu przez jon lub cząsteczkę reagentu kwantu światła ( $h\nu$  — fotonu), co wywołuje zmianę stanu elektrycznego ciała (wzrost energii elektronów reagenta — aktywizację reagenta lub odszczepienie elektronu). Zaktywizowany reagent może ulegać wtórnym reakcjom chemicznym; przekazywać uzyskaną energię innym jonom lub cząsteczkom. Tym tłumaczy się na przykład sensylibizacyjne działanie niektórych nieorganicznych i organicznych związków chemicznych (chlorofilu, karotenoidów, antocyjanów, niektórych związków siarki, złota, barwników cyjaninowych). Zaktywizowany reagent może także utracić energię uzyskaną przez promieniowanie.

Reakcje fotochemiczne często bywają reakcjami łańcuchowymi:



Wydajność kwantowa reakcji fotochemicznych, czyli stosunek  $\frac{lc}{N}$ , gdzie  $lc$  jest liczbą cząsteczek, które przereagowały chemicznie, a  $N$  — liczbą pochłoniętych fotonów, może być bardzo duża i dochodzić do  $10^5$ — $10^7$ .

Reakcje fotochemiczne są podstawą wielu procesów biochemicznych (np. fotosyntezy, otrzymywania witaminy  $D_2$ ) i chemicznych (np. polimeryzacji antracenu, chlorowania benzenu, procesu fotograficznego).

Zgodnie z prawem A. Einsteina jedna molekuła reagenta pochłania jeden foton, przy czym aktywizacja reagenta może nastąpić pod wpływem fal elektromagnetycznych, których  $h\nu$  jest większy od progu wzbudzenia reagenta (energii aktywacji reagenta). Krótsze fale elektromagnetyczne są bardziej aktywne fotochemicznie. Warunkiem funkcjonowania tego prawa jest małe natężenie strumienia światła. W strumieniu o dużym natężeniu może dochodzić do pochłonięcia przez cząsteczkę reagenta większej liczby kwantów (fotonów), których suma powoduje dopiero przekroczenie progu wzbudzenia reagenta (np. dysocjacja  $CO_2$ ,  $BCl_3$  czy  $SF_6$  przez intensywne promieniowanie podczerwone). Wynalezienie lasera umożliwiło uzyskiwanie wiązek o dostatecznym natężeniu światła. W rezultacie zjawisko to jest współcześnie pospolicie wykorzystywane w procesach technologicznych.

Już od dawna zauważono, że pod wpływem światła następuje pojawienie się barwy w grubszych warstewkach soli kamiennej (halitu) i innych chlorowcowych soli metali alkalicznych. Pojawienie się barwy następuje wskutek wydzielenia się pod wpływem działania światła metali alkalicznych w postaci atomów lub koloidalnych cząstek. W podobny sposób reagują na światło kryształiczne sole srebra.

W solach srebra pod wpływem światła zachodzi reakcja fotochemiczna, w której rezultacie oswobodzone elektrony neutralizują jony srebra i przekształcają je w atomy (metaliczne srebro). Warto przy tym zauważyć, że kryształki  $AgBr$ , zwykle będące głównym składnikiem błon światłoczułych, nie ulegają bezpośredniej reakcji fotochemicznej, lecz są na nią narażone bardziej reaktywne pod wpływem światła siarkowe związki srebra powstające na powierzchni kryształów  $AgBr$  w czasie przygotowywania emulsji światłoczułej powstającej przez zmieszanie bromku srebra z zawierającą siarkę żelatyną. Jeżeli żelatyna zostanie oczyszczona z siarki, to staje się nieprzydatna do przygotowywania emulsji światłoczułej.

Utworzony ze srebra atomowego (metalicznego) pod działaniem światła obraz nosi nazwę obrazu utajonego. Atomy srebra są tak nieliczne ( $10^{-7}$  g/cm<sup>3</sup>), a warstwa emulsji światłoczułej tak cienka (2—20  $\mu$ ), że powstały obraz wymyka się bezpośredniej obserwacji. Warto zaznaczyć, że silnie rozdrobnione srebro metaliczne jest barwy czarnej. Dopiero grubsze warstwy emulsji światłoczułej dają możliwość określenia rozmieszczenia atomów metalu (np. srebra). Powstały przez naświetlenie emulsji światłoczułej obraz

utajony zachowuje się długo, choć powoli zanika. Zanikanie da się znacznie przyspieszyć działaniem długofalowego promieniowania świetlnego (światłem czerwonym lub pomarańczowym — tzw. efekt Herschela).

Obraz utajony może być ujawniony na drodze chemicznej (wywołanie i utrwalenie). Powstałe pod wpływem światła na powierzchni kryształków AgBr zarodkowe centra pozwalają na działanie chemicznego wołacza. W efekcie bromek srebra przekształca się wokół tych centrów, redukując się do srebra atomowego (metalicznego). Obserwując proces pod mikroskopem zauważa się, że zapoczątkowany w centrach zarodkowych proces prowadzi do wydzielenia metalicznego srebra w całym kryształku i tworzenia się wypustek na kształt protuberancji. Z jednej strony im większe było natężenie światła odpowiedzialnego za powstanie obrazu utajonego, tym więcej kryształków AgBr miało centra zarodkowe i tym efektywniejsze jest wtedy działanie wołacza chemicznego. Z drugiej strony, im większe były kryształki AgBr, tym silniejszy jest skutek działania wołacza chemicznego na powierzchnie z wytworzonymi centrami zarodkowymi (zwiększona czułość emulsji światłoczułej), ale mniej precyzyjny jest otrzymany obraz działania światła na kryształki światłoczułe (obniżona rozdzielczość i możliwość rejestracji szczegółów).

Wywoływaczami chemicznymi są mieszaniny substancji:

- silnie redukujących (np. metol, hydrochinon, glicyna, amidol, fenidon, pirokatechina, pirogallol, paraaminofenol),
- alkalizujących (węglany, fosforany, borany alkaliczne, wodorotlenki),
- hamujących (np. bromek potasu, benzotriazol), rozpuszczonych w wodzie.

Uzyskany obraz rozmieszczenia drobnoziarnistego srebra metalicznego wymaga utrwalenia. Proces utrwalenia polega na usunięciu z emulsji światłoczułej substancji światłoczułej nie wyzyskanej uprzednio i przeprowadzenie jej do roztworu. Utrwalaczem jest zwykle tiosiarczan sodu z dodatkiem kwaśnego siarczynu albo pirosiarczynu sodu lub potasu.

## Luminescencja kryształów

Jarzenie (zimne świecenie) różnych ciał pod wpływem różnych czynników określa się mianem luminescencji. Odpowiedzialne za luminescencję promieniowanie powstaje w związku z przejściami tworzących jarzące ciało atomów lub cząstek ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego. Zjawisko to zostało zauważone już w XVI wieku. Zwrócono wówczas uwagę na świecenie w ciemności niektórych minerałów, takich jak diament czy rubin, jeśli zostały one uprzednio naświetlone światłem dziennym.

Energii wzbudzenia może dostarczyć:

- promieniowanie świetlne (zarówno widzialne, jak i nadfioletowe); fotoluminescencja,
- wiązka przyspieszonych elektronów (promieni katodowych); katodoluminescencja,
- promieniowanie rentgenowskie; rentgenoluminescencja,
- promieniowanie jonizujące (promieniowanie  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ , promieniowanie kosmiczne); radioluminescencja,
- reakcje chemiczne; chemiluminescencja,
- reakcje biochemiczne; bioluminescencja,
- rozcieranie, rozdrabnianie, kruszenie; triboluminescencja,
- energia pola elektrycznego; elektroluminescencja,
- krystalizacja substancji; krystaloluminescencja,
- ogrzanie poniżej temperatury żarzenia; termoluminescencja.

Dla świata minerałów najważniejsze znaczenie ma fotoluminescencja. W zależności od szybkości gaśnięcia jarzenia po zaprzestaniu wzbudzania fotoluminescencję dzieli się na:

- fluorescencję,
- fosforescencję.

Fluorescencja, której nazwa wywodzi się od fluorytu, w którym to zjawisko najwcześniej zauważono, trwa tyle, ile trwa wzbudzanie. Fosforescencja, zaobserwowana na fosforach krystalicznych, utrzymuje się jeszcze przez pewien czas po zaprzestaniu wzbudzania.

W praktyce mineralogiczno-petrograficznej większą użyteczność mają:

- fotoluminescencja, z zastosowaniem naświetlania promieniowaniem ultrafioletowym,
- katodoluminescencja jako uboczny efekt badania minerałów w mikroskopie elektronowym.

Analiza luminescencyjna polega na obserwacji i rejestracji różnych wtórnych efektów świetlnych powstających wskutek naświetlania powierzchni minerałów i skał w preparatach mikroskopowych, zglądach lub bezpośrednio w wyrobiskach kopalnianych czy odsłonięciach terenowych. Metoda ta znalazła duże zastosowanie w geologii złóż i gemmologii. W badaniach laboratoryjnych jest wykorzystywana głównie do wykrywania małych domieszek pierwiastków ziem rzadkich i substancji organicznych, z zastosowaniem specjalnie wyposażonych mikroskopów lub stanowisk badawczych. Jako cechę diagnostyczną wykorzystuje się zwykle barwę jarzenia (tab. 1).

Tabela 1

Luminescencja niektórych minerałów

Mineral lub substancja mineralna	Barwa jarzenia po naświetleniu promieniowaniem			
	świetlnym		katodowym	rentgenowym
	widzialnym	ultrafioletowym		
1	2	3	4	5
Diamant	fioletowa	zielona, niebieska, fioletowa	niebieska, zielona	niebieska
Fluoryt	fioletowa, zielona	fioletowa, zielona	fioletowa, zielona	zielona
Szafir syntetyczny (korund)		ciemnoniebieska	brunatna	czerwona
Spinel syntetyczny	czerwonawa	niebieskawo-biaława		zielona, niebieska
Rubin (korund)		czerwona		
Perły słodkowodne				zielona
Szmaragd (beryl)	zielona	czerwona		
Aleksandryt (chryzoberyl)		czerwona		

1	2	3	4	5
Apatyt		różowa, czerwona, fioletowa	żółta, lila, czerwona malinowa	żółta, zielona, niebieska
Dysten		żółta, złota	żółta, złota	żółta, zielona
Cyrkon		fioletowa, żółta, czerwona	czerwona	czerwona
Kalcyt				
Kwarc			szafirowa, różowa, fioletowa	
Scheelit		niebieska	niebieska	niebieska
Substancja bitumiczna (węglowodory)		zielona		

## Barwa kryształów

Światło przenikając przez różne ośrodki, ulega częściowemu lub całkowitemu pochłanianiu (absorpcji) i rozpraszaniu. Gdy pochłanianie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych z widma widzialnego jest bardzo intensywne, ciało pozostaje nieprzezroczyste. Gdy zaś pochłanianie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych jest niewielkie i równomierne w całym zakresie widma widzialnego, wówczas zaistniałe zmiany są niezauważalne — ciało pozostaje bezbarwne i przezroczyste. Gdy pochłanianie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych dotyczy części zakresu widma widzialnego, ciało jest barwne, a barwa jest dopełniającą do zaabsorbowanej części widma. Rozpraszanie i pochłanianie światła jest zwykle największe dla fal krótszych widma widzialnego.

Większość minerałów skałotwórczych jest przezroczysta przynajmniej w płycie cienkiej (krzemiany, glinokrzemiany, węglany, chlorki, siarczany). Tylko minerały kruszcowe są zwykle nieprzezroczyste (siarczki, arsenki, niektóre tlenki itp.). Część minerałów wykazuje właściwości pośrednie (np. sfaleryt, wurcyt, cynober).

Minerały dzieli się na barwne i zabarwione. Minerały barwne (idiochromatyczne) mają stałą, niezmienną barwę, którą zawdzięczają obecności pierwiastka, będącego konstytucyjnym składnikiem minerału (np. malachit — zielony, azuryt — niebieski, piryt — złocisty, cynober — czerwony). Minerały zabarwione (allochromatyczne) zaś mają barwę wynikającą z obecności drobnodyspersyjnych pigmentów bądź też defektów sieciowych typu

centrów barwnych (np. kwarc — różowy, fioletowy, żółty, czarny, brunatny; fluoryt — fioletowy, zielony, biały, czerwony, niebieski, brunatny). Spotyka się też barwy naleciałe, tworzące ciekawą powłokę barwnych produktów przemiany (np. utleniania, redukcji) na powierzchni minerału macierzystego. Minerale barwne od zabarwionych można odróżnić na podstawie rysy — bezbarwnej u minerałów zabarwionych i barwnej u minerałów barwnych. Minerale pseudochromatyczne zawdzięczają swoją barwną migotliwość (iryzację) interferencji światła odbitego od subtelnych, gęsto rozmieszczonych szczelinek łupliwości lub od powierzchni zbliżniaczeń polisyntetycznych (np. labrador lub perysteryt z plagioklazów). Barwa ciała może być spowodowana selektywnym odbiciem niektórych części widma widzialnego lub ich pochłanianiem. Bywa, że część widma fal elektromagnetycznych jest równocześnie silnie odbijana i pochłaniana (np. miedź rodzima, złoto rodzime).



## Odbicie światła przez kryształy

Gdy światło pada na granicę ośrodków różniących się prędkością rozchodzenia się fal elektromagnetycznych, wówczas oprócz promienia załamane-  
go powstaje zawsze promień odbity. Kąt zawarty między normalną granicy ośrodków i kierunkiem rozchodzenia się fali odbitej nosi nazwę kąta odbicia. Jeśli powierzchnia odbijająca światło jest płaska i odpowiednio gładka, wypolerowana (nierówności mniejsze od długości fali użytego światła), to fala nie ulega zakłóceniu i rozpraszaniu przy odbiciu. Jeśli powierzchnia odbijająca nie jest równa, to fala odbita różni się od fali padającej, ponieważ zachodzi rozpraszanie przy odbiciu.

Zdolność odbijająca powierzchni granicznej ( $R$  — refleksyjność), czyli stosunek natężenia światła odbitego ( $I_o$ ) do natężenia światła padającego ( $I_p$ ), niekiedy zależy bardzo silnie od długości fali użytego światła.

$$R = \frac{I_o}{I_p}$$

(iloraz ten mnoży się zwykle przez 100, podając wartość w procentach).

W metalach występuje selektywne odbicie światła związane z absorpcją przez metal pewnej długości fali elektromagnetycznej, co przejawia się charakterystycznym zabarwieniem metalu.

Zjawiska odbicia fal elektromagnetycznych zostały opisane ilościowo przez A. J. Fresnela w 1823 roku (wzory Fresnela).

Gdy światło pada prostopadłe (kąt padania  $\alpha = 0$ ) na granicę ciała izotropowego pochłaniającego równomiernie i nieznacznie składowe widma świetlnego (niska absorpcja), wtedy natężenie promienia odbitego nie zależy od kierunku drgań względem płaszczyzny przechodzącej przez wiązkę padającą i odbitą. Refleksyjność jest funkcją współczynnika załamania światła ośrodka odbijającego i ma postać:

$$R = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2,$$

gdzie:

$R$  — refleksyjność ośrodka,

$n$  — współczynnik załamania światła tego ośrodka.

Przykładowo, dla szkła, którego  $n = 1,5$ , refleksyjność wynosi 0,04. Oznacza to, że na granicy powietrze/szkło odbiciu ulega 4% energii światła padającego. Z innych przykładów (sfaleryt  $n = 2,4$ ,  $R = 0,17$ ; pirop  $n = 1,7$ ,  $R = 0,07$ ; kwarc  $n = 1,55$ ,  $R = 0,045$ ) wynika, że minerały o  $n > 1$  tym silniej odbijają światło, im wyższy jest ich współczynnik załamania światła.

Dla minerałów i ciał silnie absorbujących światło konieczne jest uwzględnienie współczynnika absorpcji światła ( $K$ ). Refleksyjność takich minerałów wyraża się wówczas wzorem:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + K^2}{(n + 1)^2 + K^2},$$

gdzie:

$R$  — refleksyjność ośrodka,

$n$  — współczynnik załamania światła ośrodka,

$K$  — współczynnik absorpcji światła ośrodka.

Refleksyjność ciał o jednakowych współczynnikach załamania światła jest tym większa, im większa jest ich absorpcja światła. Minerały nieprzezroczyste zatem odbijają światło silniej niż minerały przezroczyste o takim samym współczynniku załamania światła.

Wzory Fresnela przybierają inną postać w przypadku, gdy drgania wektora elektrycznego fali elektromagnetycznej światła padającego zachodzą równolegle ( $\parallel$ ), a inną, gdy drgania wektora elektrycznego fali elektromagnetycznej zachodzą prostopadłe ( $\perp$ ) do płaszczyzny padania wyznaczonej przez promień padający ( $\alpha$ ), odbity i załamany ( $\beta$ ).

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2 (\alpha - \beta)}{\sin^2 (\alpha + \beta)}; \quad R_{\parallel} = \frac{\operatorname{tg}^2 (\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2 (\alpha + \beta)},$$

gdzie:

$R$  — stosunek natężenia promienia odbitego do natężenia promienia padającego.

W kryształach anizotropowych refleksyjność zależy od kierunku. Można ją zobrazować i odwzorować za pomocą powierzchni jedno- i dwupowłokowych; w praktyce mineralogiczno-petrograficznej najchętniej stosuje się te pierwsze.

Refleksyjność kryształów regularnych odwzorowuje kula. Dla kryształów regularnych przezroczystych (słabo absorbujących światło) refleksyjność odwzorowuje kula o promieniu  $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$ . Dla kryształów regularnych nieprzezroczystych (silnie absorbujących światło) refleksyjność odwzorowuje kula o promieniu  $R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2}$ .

Refleksyjność kryształów jednoosiowych optycznie odwzorowuje elipsoida obrotowa o półosiach:

$$R_{\omega} = \left( \frac{n_{\omega} - 1}{n_{\omega} + 1} \right)^2, \quad R_{\epsilon} = \left( \frac{n_{\epsilon} - 1}{n_{\epsilon} + 1} \right)^2, \quad \text{w kryształach przezroczystych;}$$

$$R_{\omega} = \frac{(n_{\omega} - 1)^2 + K_{\omega}^2}{(n_{\omega} + 1)^2 + K_{\omega}^2}, \quad R_{\epsilon} = \frac{(n_{\epsilon} - 1)^2 + K_{\epsilon}^2}{(n_{\epsilon} + 1)^2 + K_{\epsilon}^2}, \quad \text{w kryształach nieprzezroczystych.}$$

Elipsoida obrotowa refleksyjności kryształów jednoosiowych jest zorientowana w bryle geometrycznej kryształu identycznie do indykatrixy tego kryształu. Kryształy jednoosiowe, których refleksyjność  $R_{\epsilon} > R_{\omega}$ , są nazywane optycznie dodatnimi, a gdy  $R_{\epsilon} < R_{\omega}$  — optycznie ujemnymi.

Refleksyjność kryształów dwuosiowych odwzorowuje w przybliżeniu elipsoida trójsiowa o półosiach:

$$R_{\alpha} = \left( \frac{n_{\alpha} - 1}{n_{\alpha} + 1} \right)^2, \quad R_{\beta} = \left( \frac{n_{\beta} - 1}{n_{\beta} + 1} \right)^2, \quad R_{\gamma} = \left( \frac{n_{\gamma} - 1}{n_{\gamma} + 1} \right)^2, \quad \text{w kryształach przezroczystych;}$$

$$R_{\alpha} = \frac{(n_{\alpha} - 1)^2 + K_{\alpha}^2}{(n_{\alpha} + 1)^2 + K_{\alpha}^2}, \quad R_{\beta} = \frac{(n_{\beta} - 1)^2 + K_{\beta}^2}{(n_{\beta} + 1)^2 + K_{\beta}^2}, \quad R_{\gamma} = \frac{(n_{\gamma} - 1)^2 + K_{\gamma}^2}{(n_{\gamma} + 1)^2 + K_{\gamma}^2}, \quad \text{w kryształach nieprzezroczystych.}$$

Refleksyjność jest indywidualną cechą minerałów i ma duże znaczenie diagnostyczne. Dla określonego przekroju minerału wartość refleksyjności obrazuje odpowiedni przekrój bryły odwzorowującej, który może być kołem lub elipsą. W praktyce mineralogiczno-petrograficznej refleksyjność minerałów określa się zwykle empirycznie, procentowo, zależnie od długości fali użytego światła monochromatycznego. Często zadowalające jest już określenie przy-

blizonej wartości tego parametru. Uzyskuje się to przez porównanie badanego ciała z wzorcem (z wykorzystaniem mikroskopu kruszcowego). Dokładniejszą ocenę refleksyjności można uzyskać, stosując pomiar światła odbitego fotometrem. W tym przypadku błąd pomiaru nie przekracza 5—10%. Najdokładniejsze wyniki daje zastosowanie ogniwa fotoelektrycznego skalibrowanego wzorcem. Wówczas błąd pomiaru nie przekracza 0,5%.

Refleksyjność minerałów anizotropowych, jak już wspomniano wyżej, zależy od kierunku padania wiązki światła. Wraz ze zmianą kierunku padania światła zaznacza się zatem zmiana natężenia światła odbitego. Różnica natężeń światła odbitego przez analogię do dwójłomności została określona jako dwójodbicie (zwane dawniej także pleochroizmem refleksyjnym) i oznaczona symbolem „ $\Delta R$ ”. Obecnie pod nazwą pleochroizmu refleksyjnego rozumie się wywołane dwójodbiciem zmiany barwy minerału.

Dwójodbicie kryształów jednoosiowych przezroczystych wyraża się wzorem:

$$\Delta R = R_e - R_o.$$

Dwójodbicie ma w tych kryształach znak dodatni lub ujemny. W kryształach jednoosiowych dodatnich dwójodbicie ma znak dodatni, a w kryształach ujemnych — ujemny.

Dwójodbicie kryształów dwuosiowych przezroczystych wyraża się wzorem:

$$\Delta R = R_\gamma - R_\alpha.$$

Dla charakterystyki optycznej kryształów nieprzezroczystych konieczne jest uwzględnienie dwójabsorpcji światła, która wynosi odpowiednio:

$$\Delta K_I = K_e - K_o, \text{ w kryształach nieprzezroczystych jednoosiowych;}$$

$$\Delta K_{II} = K_\gamma - K_\alpha, \text{ w kryształach nieprzezroczystych dwuosiowych.}$$

Wizualna ocena dwójodbicia dobrze zgadza się z obliczonymi wartościami względnego dwójodbicia ( $\Delta r$ ), mniej z obliczoną wartością dwójodbicia ( $\Delta R$ ).

Względne dwójodbicie w kryształach jednoosiowych optycznie wyraża się wzorem:

$$\Delta r = \frac{2\Delta R}{R_e + R_o} \cdot 100,$$

a w kryształach dwuosiowych optycznie:

$$\Delta r = \frac{2\Delta R}{R_\gamma + R_\alpha} \cdot 100.$$

## Kryształy pod mikroskopem polaryzacyjnym

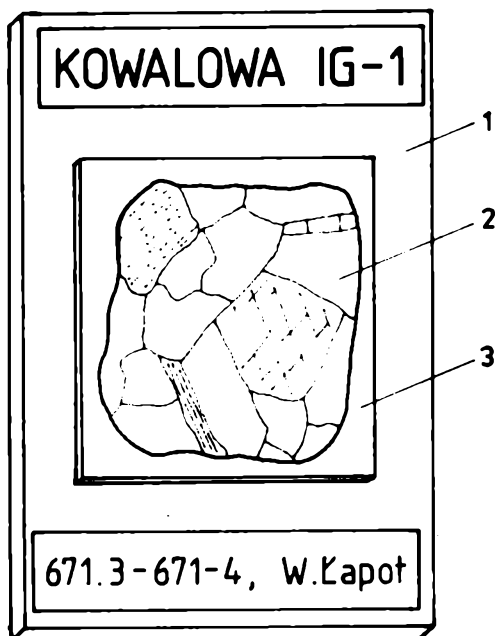
Mimo ogromnego postępu w metodach badania minerałów i skał mikroskop polaryzacyjny jest nadal narzędziem niezwykle użytecznym. Badania mikroskopowe dają możliwość szybkiej, pewnej i taniej identyfikacji wielu minerałów i skał oraz innych substancji. W odróżnieniu od wielu metod instrumentalnych, niekiedy bardzo wyrafinowanych, pozwalają na równoczesne określenie rodzaju minerału, sposobu jego wykształcenia, budowy wewnętrznej oraz rozmieszczenia i zawartości w skale.

Mikroskop polaryzacyjny został skonstruowany przez W. H. F. Talbota (1800—1877) około 1834 roku. Do badania minerałów i skał zastosował go po raz pierwszy H. C. Sorby (1826—1908) około 1849 roku, kładąc podwaliny nowoczesnej petrografii pracą *On the Microscopical Structure of Crystals. Indicating the Origin of Minerals and Rocks* (1858). H. C. Sorby stał się również prekursorem wykorzystania mikroskopu polaryzacyjnego w metalografii. Jego dziełem były też pierwsze preparaty mikroskopowe.

### 18.1. Preparaty mikroskopowe

W badaniach mikroskopowych są używane:

- preparaty do badań w świetle przechodzącym (tzw. płytki cienkie — wykonywane z minerałów i skał, w tym i węgli) (rys. 39),



Rys. 39. Budowa preparatu mikroskopowego do światła przechodzącego (tzw. płytki cienkiej)

- preparaty do badań w świetle odbitym (tzw. zgłady — wykonywane z metali, węgla i minerałów silnie absorbujących światło, głównie kruszcowych),
- preparaty uniwersalne (tzw. polerowane płytki cienkie, wykonywane z minerałów i skał, rzadziej kruszców).

Preparaty mikroskopowe powstają przez obróbkę skrawka minerału lub skały, zwykle o wielkości 25 mm × 25 mm. Przez ścieranie i polerowanie proszkami i pastami szlifierskimi (np. pył korundowy lub karborundowy w wodzie, nafcie, oleju) pod kontrolą mikroskopową dąży się do ścienienia skrawka aż do grubości 0,02—0,03 mm. Preparaty mikroskopowe do badań w świetle odbitym mogą mieć dowolną grubość, zwykle 1—3 cm. Tylko preparaty z węgla wykorzystywane do badań w świetle przechodzącym muszą być bardzo cienkie (3—10  $\mu\text{m}$ , bywa że około 0,5  $\mu\text{m}$ ). Badany skrawek minerału, a zwłaszcza skały może mieć precyzyjną orientację w przestrzeni w stosunku do jakiegoś układu odniesienia (np. geograficznego). Są to preparaty orientowane. Preparaty mikroskopowe mogą być wykonywane z drobnych okruszków skalnych i mineralnych (tzw. preparaty proszkowe lub ziarnowe). Tego rodzaju preparaty szczególnie często wykonuje się ze skał sypkich (np. z piasków, z frakcji ciężkiej skał osadowych) lub z węgla.

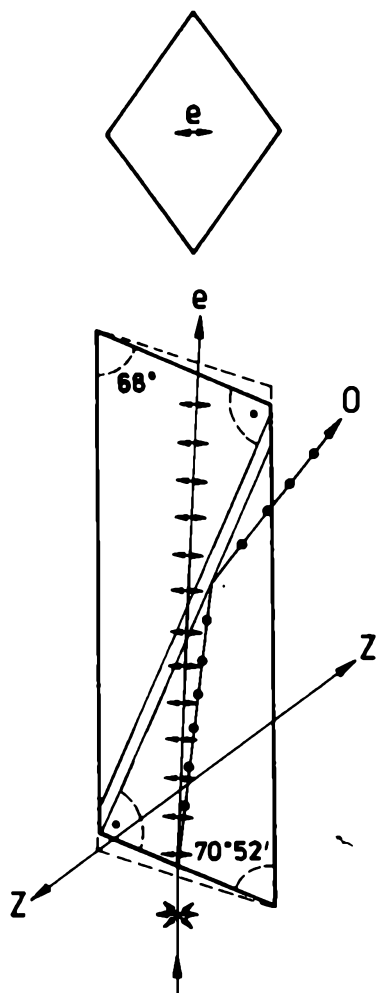
Do zlepienia i klejenia preparatów mikroskopowych stosuje się substancje dobrze przejrzyste, których współczynnik załamania światła jest bliski współczynnikowi załamania światła najczęściej spotykanych minerałów skałotwórczych. Na ogół stosuje się do tego celu balsam kanadyjski (żywica), szkła organiczne, parafinę, tworzywa akrylowe itp.

## 18.2. Otrzymywanie światła spolaryzowanego

Elementy optyczne służące do wytwarzania (polaryzatory), wykrywania i badania (analizatory) światła spolaryzowanego oraz urządzenia, w których skład wchodzi zespół elementów polaryzujących światło, służące do obserwacji i pomiarów optycznych (np. mikroskop polaryzacyjny, ortoskop, kompensator, filtry optyczne, szczypce turmalinowe) to przyrządy polaryzacyjne.

Polaryzatorami nazywa się zwykle elementy optyczne wytwarzające światło spolaryzowane liniowo. Światło spolaryzowane kołowo lub eliptycznie otrzymuje się za pomocą ćwierćfalówek. W przypadku światła spolaryzowanego liniowo ten sam element optyczny może pełnić funkcję polaryzatora i analizatora. Światło spolaryzowane eliptycznie jest wykrywane i badane za pomocą analizatora, którego konstrukcja różni się istotnie od polaryzatora. Jest to zwykle kompensator optyczny specjalnej konstrukcji (tzw. eliptyczny), umożliwiający przekształcenie światła spolaryzowanego eliptycznie w światło spolaryzowane liniowo.

Jednym z najstarszych elementów optycznych, służących do wytwarzania światła spolaryzowanego liniowo, był polaryzator konstrukcji W. Nicola (1768—1851) wykonany około 1828 roku z odpowiednio oszlifowanego kryształu szpatu islandzkiego (przezroczystego kalcytu). Od nazwiska twórcy jest nazywany nikolem lub pryzmatem Nicola (rys. 40). Po oszlifowaniu romboedru kalcytu, którego naturalne ściany tworzą ze sobą kąty ostre  $70^{\circ}52'$  i kąty rozwarte  $109^{\circ}08'$ , uzyskuje się nowe nachylenie ścian względem siebie w kątach ostrych  $68^{\circ}$  i kątach rozwartych  $112^{\circ}$ . Tak spreparowany romboedr kalcytu rozcina się na dwie części płaszczyzną prostopadłą do mniejszych ścian i płaszczyzny symetrii zawierającej oś optyczną. Obie części są następnie sklepane balsamem kanadyjskim o współczynniku załamania światła  $n = 1,545$ , która to wartość jest mniejsza od współczynnika załamania światła promienia zwyczajnego kalcytu  $n_o = 1,659$ , a większa od współczynnika załamania światła promienia nadzwyczajnego kalcytu  $n_e = 1,486$  (dla kierunku biegu tego promienia przez nikol  $n_z \approx 1,52$ ). Wiązkę światła niespolaryzowanego rzutuje się równolegle do dłuższej krawędzi romboedru. Powstały w wyniku



Rys. 40. Pryzmat Nicola

podwójnego załamania światła i jednocześnie polaryzacji promień zwyczajny pada na powierzchnię balsamu kanadyjskiego pod kątem większym od kąta granicznego i ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu, by następnie ulec całkowitej absorpcji na wyczernionych ściankach bocznych pryzmatu. Promień nadzwyczajny przechodzi natomiast przez pryzmat bez zmiany kierunku. Drgania promienia nadzwyczajnego zachodzą w kierunku wyznaczonym przez położenie przekroju głównego kryształu kalcytu, czyli w przekroju zawierającym oś optyczną.

Na podobnej zasadzie działania są oparte także inne pryzmaty polaryzacyjne (np. pryzmat A. Prażmowskiego, 1821—1885). Tego rodzaju elementy optyczne służące do otrzymywania światła spolaryzowanego opiera się na wykorzystaniu zjawiska podwójnego załamania światła i jednocześnie polaryzacji światła oraz wytworzeniu możliwości likwidacji jednego z powstałych w wyniku podwójnego załamania światła promieni spolaryzowanych. Takie polaryzatory umożliwiają uzyskiwanie światła dokładnie i całkowicie spolaryzowanego liniowo.

Wyczerpywanie się jednak łatwo dostępnych złóż szpatu islandzkiego skłoniło konstruktorów przyrządów polaryzacyjnych do sięgnięcia po polaroidy (błony

polaryzacyjne). Są to polaryzacyjne filtry świetlne umożliwiające otrzymywanie światła spolaryzowanego liniowo wskutek przepuszczenia promieni świetlnych drgających tylko w jednym, określonym kierunku (azymucie), a pochłonięcia niemal całkowitego promieni świetlnych drgających w innych kierunkach. Polaroidy mają postać cienkich folii lub płaskich płytek wykonanych z przezroczystego tworzywa sztucznego zawierającego wydłużone, ułożone równolegle obok siebie i jednakowo optycznie zorientowane kryształki wykazujące silny dichroizm (np. herapatyt, czyli siarczan jodochininy, alkohol poliwinylowy). Dużą zaletą polaroidów jest możliwość polaryzacji światła nie tylko w obszarze widzialnym widma świetlnego, lecz także w bliskim nadfiolecie

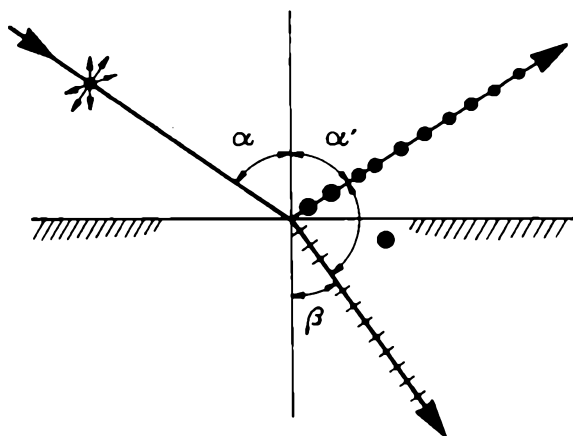


i bliskiej podczerwieni. Wadą polaroidów jest niepełna polaryzacja uzyskiwanego w taki sposób światła.

Na podobnej zasadzie odbywa się otrzymywanie światła spolaryzowanego liniowo wskutek selektywnego pochłaniania w grubszych płytkach minerałów silnie pleochroicznych (np. płytkach turmalinowych). Wykorzystuje się tutaj zjawisko różnicy absorpcji światła spolaryzowanego drgającego w płaszczyznach różnie zorientowanych i o różnych długościach fali. Absorpcja światła spolaryzowanego o określonej długości fali, drgającego w określonym kierunku, jest tym większa, im większa jest grubość płytki krystalicznej absorbującej światło. Wadą takich elementów optycznych jest niepełna polaryzacja uzyskiwanego światła oraz wyraźna barwa, która przeszkadza w badaniach optycznych. Takie elementy optyczne mają ograniczone zastosowanie (np. w gemmologii).

Współczesne mikroskopy polaryzacyjne i większość urządzeń polaryzacyjnych jest wyposażana w polaroidy jako elementy optyczne służące do wytwarzania, wykrywania i analizowania światła spolaryzowanego.

Bardzo rzadko stosowanym w praktyce sposobem otrzymywania światła spolaryzowanego liniowo jest wykorzystanie zjawiska polaryzacji światła przez odbicie i załamanie na granicy dwu ośrodków (odbicie od powierzchni dielektryka). Zjawisko to zostało zbadane około 1815 roku przez D. Brewstera (1781—1868). Światło naturalne padając ukośnie na powierzchnię dielektryka, ulega nie tylko częściowemu odbiciu, lecz także polaryzacji (rys. 41).



Rys. 41. Polaryzacja światła przez odbicie i załamanie (kąt Brewstera):

$\alpha$  — kąt padania,  $\alpha'$  — kąt odbicia,  $\beta$  — kąt załamania

Polaryzacji promienia odbitego towarzyszy również częściowa polaryzacja promienia załamanego. Drgania promienia odbitego zachodzą w płaszczyźnie

prostopadłej do płaszczyzny padania, a promienia załamane w płaszczyźnie padania. Całkowita liniowa polaryzacja wiązki odbitej zachodzi tylko wówczas, gdy kąt padania ( $\alpha$ ) spełnia zależność:

$$n = \operatorname{tg} \alpha,$$

gdzie:

$n$  — współczynnik załamania światła dielektryka.

Taki kąt padania bywa nazywany kątem Brewstera. Promień odbity i załamany tworzą ze sobą kąt prosty. Sytuacja taka występuje tylko wtedy, kiedy odbicie i załamanie odbywa się na granicy dwu ośrodków przezroczystych (np. powietrza i szkła).

### 18.3. Mikroskopy polaryzacyjne (petrograficzny, kruszcowy, uniwersalny)

Mikroskop polaryzacyjny jest to przyrząd polaryzacyjny służący do obserwacji ciał anizotropowych. Mikroskopy te ze względu na drogę światła można podzielić na przygotowane do badań w świetle:

- przechodzącym (mikroskop petrograficzny, zwany także transmisyjnym),
- odbitym (mikroskop kruszcowy, zwany także refleksyjnym),
- przechodzącym i odbitym (mikroskop uniwersalny).

Współczesne mikroskopy polaryzacyjne składają się z czterech podstawowych układów:

- optycznego (obiektyw, okular, soczewki do badań specjalnych),
- polaryzującego i analizującego światło (polaryzator i analizator, czyli ortoskop),
- oświetlającego światłem naturalnym lub sztucznym (kondensor, źródło światła),
- mechanicznego (statyw, ruchomy stolik mikroskopu, tubus, śruby regulacyjne).

Zasada działania mikroskopu polega na oświetleniu badanego ciała za pomocą układu oświetlającego. Promienie światła przechodzącego (mikroskop petrograficzny) lub odbitego (mikroskop kruszcowy) od poszczególnych punktów badanego ciała padają na obiektyw, tworzący obraz rzeczywisty, odwrócony i silnie powiększony (maksymalnie ok.  $100\times$ ), który jest następnie powiększony kilka lub kilkanaście razy przez okular.

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi mikroskop są:

- powiększenie, czyli stosunek wielkości obrazu do wielkości przedmiotu,
- zdolność rozdzielcza, czyli odwrotność najmniejszej odległości dwu punktów, które dają jeszcze rozróżnialne obrazy.

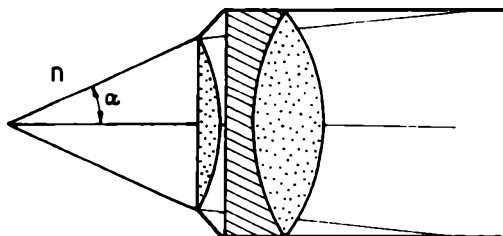
Maksymalne użyteczne powiększenie mikroskopu polaryzacyjnego nie przekracza zwykle 1500—2000 razy, gdyż warunkuje to zdolność rozdzielczą, która z kolei jest ograniczana ugięciem światła i rośnie wraz ze wzrostem apertury i zmniejszeniem długości użytej fali świetlnej.

Apertura (łac. otwarcie) to wielkość decydująca o zdolności rozdzielczej układów optycznych (np. obiektywu) i jasności dawanych przez nie obrazów. Wyróżnia się aperturę kątową, określoną przez kąt zawarty między skrajnymi promieniami stożkowej wiązki światła wchodzącej do układu optycznego ze źródła światła, oraz aperturę liczbową, określoną przez E. Abbego (1840—1905) wzorem:

$$A = n \sin \alpha,$$

gdzie:

- $n$  — współczynnik załamania światła ośrodka, w którym jest umieszczony badany przedmiot (np. powietrze, woda, olej, gliceryna),
- $A$  — apertura liczbowa,
- $\alpha$  — połowa apertury kątowej (rys. 42).



Rys. 42. Apertura obiektywu

Zdolność rozdzielcza mikroskopu jest proporcjonalna do apertury liczbowej, a jasność uzyskanego obrazu proporcjonalna do jej kwadratu. Z wzoru E. Abbego wynika, że można łatwo wpłynąć na wartość apertury liczbowej przez zmianę ośrodka, w którym mieści się badany przedmiot.

Obiektywy stosowane w mikroskopach polaryzacyjnych niewiele się różnią od obiektywów używanych w mikroskopach biologicznych. W mikroskopach polaryzacyjnych są to następujące obiektywy:

- długoogniskowe ( $f > 15$  mm,  $A < 0,3$ ),
- średnioogniskowe ( $4$  mm  $< f < 15$  mm,  $0,65 < A < 0,3$ ),
- krótkoogniskowe ( $f < 4$  mm,  $A > 0,65$ ).

Używane w mikroskopach obiektywy są elementami optycznymi złożonymi, gdyż muszą spełniać wysokie wymagania, zwłaszcza w likwidacji wad odwzorowań optycznych, przejawiających się tym, że otrzymywany obraz jest nieostry, zniekształcony lub barwnie rozwarstwiony (aberracje). Najprostszymi obiektywami są achromaty, w których aberracja chromatyczna (dyspersyjne obwódki barwne na konturach obrazu) została skorygowana dla linii Fraunhofera *C* i *F*. Prawie cały zakres fal elektromagnetycznych widma światła białego jest skorygowany w obiektywach apochromatycznych. Pośredni stopień korekcji aberracji chromatycznej mają obiektywy fluorytowe (obiektywy półchromatyczne). Obiektywy ze skorygowaną aberracją sferyczną (nieostry, zniekształcony obraz) i chromatyczną są nazywane planachromatami i planapochromatami. Informacje o ogniskowej, aperturze, krotności dawanego powiększenia oraz o zastosowanej korekcji aberracji i przeznaczeniu obiektywu zwykle są wyryte na oprawce obiektywu.

W mikroskopach polaryzacyjnych używa się na ogół dwóch typów okularów:

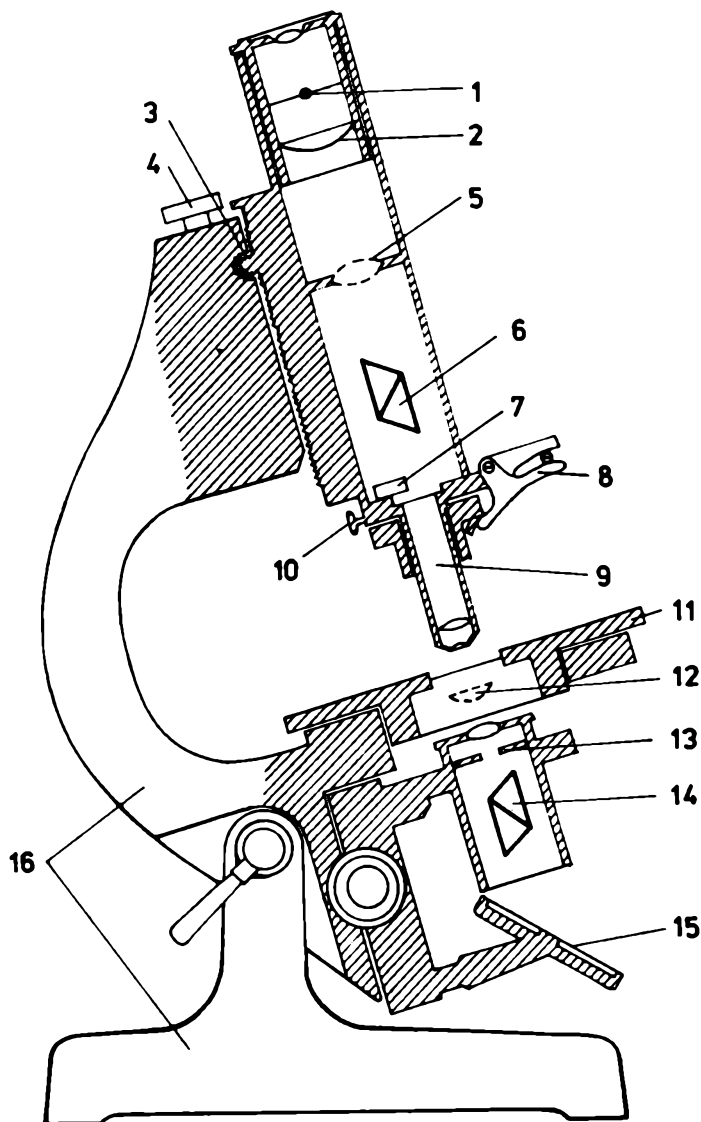
- okularu Huyghensa (zwanego ujemnym), zbudowanego z dwu różnych soczewek płasko-wypukłych oddalonych nieco od siebie i zwróconych płaską stroną do obserwatora (soczewka pola — od strony przedmiotu, soczewka oka, czyli kolektyw — od strony oka obserwatora),
- okularu Ramsdena (zwanego dodatnim), zbudowanego z dwu jednakowych soczewek zwróconych wypukłościami ku sobie.

Rzadziej stosuje się okulary Kellera, Kerbera, kompensacyjne, specjalne i pomiarowe (z podziałką mikrometryczną, z siatką równopowierzchniową, z podziałkami specjalnymi). W okularze jest umieszczony krzyż z nitek pajęczych, których położenie odwzorowuje płaszczyzny drgań polaryzatora (nić pionowa) i analizatora (nić pozioma) lub odwrotnie (w niektórych mikroskopach). Przy korekcji aberracji okularów największą wagę przykładają się do korekcji aberracji chromatycznej i astygmatyzmu powiększenia. (Informacje o krotności powiększenia, rzadziej o zastosowanej korekcji lub specjalnym przeznaczeniu są wyryte na oprawce okularów).

Do badań w świetle zbieżnym (konoskopowych) stosuje się dodatkową soczewkę powiększającą, zwaną soczewką Bertranda — Amiciego. Spełnia ona funkcję lupy w stosunku do obrazów konoskopowych.

Źródłem światła we współczesnych mikroskopach polaryzacyjnych jest przeważnie żarówka halogenowa, dostarczająca światła białego, będącego mieszaniną fal elektromagnetycznych różnej długości. Kondensor, skonstruowany w 1872 roku przez E. Abbego, umożliwia prawidłowe oświetlenie oglądanego obiektu w świetle przechodzącym, dając bardzo silne oświetlenie oraz przetwarzając rozbieżną wiązkę światła pochodzącą ze źródła w szerokie pasmo promieni równoległych lub stożkowo zbieżnych. Diafragmy umieszczone w układzie oświetlającym (oświetlaczu) pozwalają na regulowanie

oświetlenia i eliminowanie wiązek światła odchylonych od osi optycznej mikroskopu (rys. 43). Silnie zbieżnej wiązki światła dostarcza soczewka o bardzo dużej aperturze (około 0,9), nazywana soczewką Lasaulx, w starszych konstrukcjach mikroskopowych wsuwana za pomocą dźwigni ponad oświetlacz, w nowszych — będąca integralną częścią oświetlacza. Zbieżną wiązkę światła wykorzystuje się w badaniach konoskopowych.



Rys. 43. Schemat mikroskopu petrograficznego:

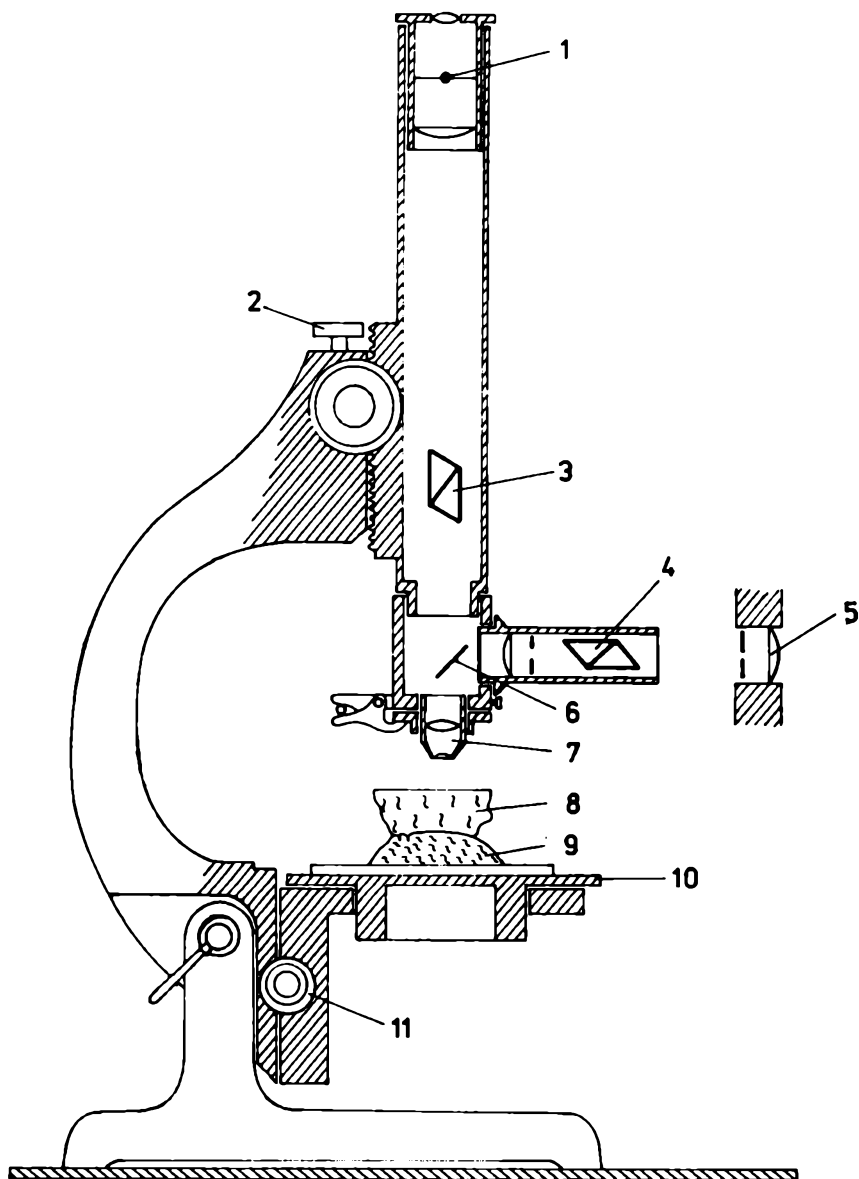
1 — krzyż mikowy, 2 — okular, 3, 4 — śruby mikrometryczne i makrometryczne, 5 — soczewka Bertranda Amicięgo, 6 — analizator, 7 — szczerbina, 8 — uchwyt klasyczny, 9 — obiektyw, 10 — śruby do centrowania, 11 — stolik obracalny, 12 — soczewka Lasaulx, 13 — przyłona irysowa, 14 — polaryzator, 15 — lustro, 16 — statyw

Z oświetlaczem zintegrowany jest polaryzator (pryzmat Nicola w starszych konstrukcjach mikroskopowych, polaroid w nowszych mikroskopach), który obraca się wokół osi optycznej mikroskopu i dostarcza światła spolaryzowanego liniowo. Podobny element optyczny znajduje się ponad obiektywem w położeniu prostopadłym do płaszczyzny polaryzacji polaryzatora i jest nazywany analizatorem. W bieg strumienia światła zostaje wprowadzony odpowiednią dźwignią (nikole skrzyżowane; choć w nowszych typach mikroskopów stosuje się polaroidy, to przyjęło się, aczkolwiek niesłusznie, mówić o nikolach, o obserwacjach przy jednym nikolu lub o nikolach skrzyżowanych). Przez obrót oprawką polaryzatora lub analizatora o  $90^\circ$  doprowadza się do równoległości płaszczyzn drgań polaryzatora i analizatora (nikole równoległe). Wyprowadzenie analizatora z biegu strumienia światła umożliwia dokonywanie obserwacji bez analizatora. Wyprowadzenie polaryzatora i analizatora z biegu strumienia światła umożliwia obserwacje w świetle niespolaryzowanym (mikroskop biologiczny).

Układ mechaniczny mikroskopu utrzymuje we właściwym wzajemnym położeniu składniki pozostałych układów i umożliwia dokonywanie nimi precyzyjnych manipulacji. Śruba makro- i mikrometryczna pozwala na podnoszenie i opuszczanie stolika mikroskopu z różną dokładnością. Na stoliku mikroskopu montuje się stolik krzyżowy utrzymujący preparat mikroskopowy. Podziałka kątowa z noniuszem pozwala wykonać precyzyjną rotację stolikiem mikroskopu z równoczesnym pomiarem kąta obrotu. Wycięta w dolnej części tubusa szczelina ustawiona pod kątem  $45^\circ$  w stosunku do płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora umożliwia wykorzystanie płytek pomocniczych oraz badanie preparatów specjalnych.

Mikroskop kruszcowy ma oświetlacz boczny (opak-iluminator, rys. 44). Jest to kondensor, polaryzator, zespół monochromatorów lub — spełniających podobne zadanie — filtrów i diafragm oraz pryzmat (pryzmat Nacheta) lub płytka szklana (płytką Beckego) odchylająca bieg strumienia światła, które po wyjściu z opak-iluminatora przechodzi przez obiektyw i dociera do powierzchni preparatu. Tutaj część światła ulega załamaniu i absorpcji przez minerał, a część zostaje odbita od powierzchni lub głębszych warstw preparatu (refleksy wewnętrzne) i wraca ponownie przez obiektyw, analizator (jeśli jest włączony w bieg strumienia światła) i okular do oka obserwatora. Obiektywy mikroskopów kruszczowych są specjalnie przystosowane do obserwacji preparatów odkrytych polerowanych i nie nadają się do badań w mikroskopach petrograficznych.

Zalety i możliwości mikroskopów: petrograficznego i kruszczowego łączy w sobie mikroskop uniwersalny. Daje on możliwość szybkiego przestawienia się z badań w świetle przechodzącym na badania w świetle odbitym. Mikroskop uniwersalny jest wyposażony w dwa układy oświetlające oraz w dwa zespoły układu optycznego przeznaczone do badań w świetle przechodzącym i odbitym. Tego rodzaju mikroskopy szczególnie są przydatne do obserwacji



Rys. 44. Schemat mikroskopu kruszcowego:

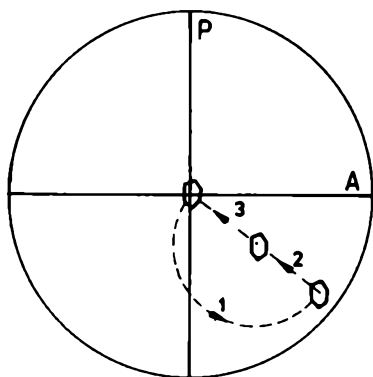
1 — okular, 2 — śruba mikrometryczna, 3 — analizator, 4 — polaryzator, 5 — soczewka skupiająca światło emitowane ze źródła światła, 6 — płytka szklana lub pryzmat, 7 — obiekt, 8 — preparat polerowany, 9 — plastelina, 10 — stolik mikroskopu, 11 — śruba makrometryczna

wykonywanych z wykorzystaniem preparatów uniwersalnych, umożliwiającich jednocześnie zbadanie minerałów przezroczystych i nieprzezroczystych tworzących obserwowany obiekt.

### 18.3.1. Obsługa mikroskopu polaryzacyjnego

We właściwie przygotowanym do pracy mikroskopie oś optyczna mikroskopu powinna się zlewać z osią obrotu stolika mikroskopu i przechodzić przez środek pola widzenia wyznaczony położeniem punktu przecięcia się nitek pajęczych okularu. Jeśli taka zgodność istnieje, to wszystkie elementy obserwowanego w okularze obrazu zataczają współśrodkowe kręgi podczas rotacji stolikiem mikroskopu. Środek tych kręgów powinien się pokrywać z punktem przecięcia nitek pajęczych okularu (mikroskop scentrowany). Jeśli takiej zgodności nie ma, to mikroskop nie jest scentrowany.

Czynności uzgadniania osi optycznej mikroskopu z osią obrotu stolika mikroskopu są nazywane centrowaniem mikroskopu. Procedura centrowania mikroskopu obejmuje (rys. 45):



Rys. 45. Centrowanie mikroskopu:

P, A — pionowa i pozioma krzyża nici pajęczych okularu; 1 — przemieszczenie wybranego punktu obrotem stolika mikroskopu, 2 — przemieszczenie wybranego punktu śrubami do centrowania, 3 — przemieszczenie wybranego punktu śrubami stolika krzyżowego mikroskopu

- wybór charakterystycznego punktu w obrazie mikroskopowym,
- naprowadzenie śrubami stolika krzyżowego wybranego punktu na skrzyżowanie nitek pajęczych okularu,
- przemieszczenie wybranego punktu obrotem stolika mikroskopu o  $180^\circ$  po kręgu, jaki zatacza,
- przemieszczenie tego punktu śrubami do centrowania umieszczonymi w oprawce obiektywu o około  $1/2$  odległości, która dzieli go od środka pola widzenia (punktu przecięcia się nitek pajęczych okularu),
- przesunięcie śrubami stolika krzyżowego wybranego punktu na skrzyżowanie nitek pajęczych okularu,
- sprawdzenie przez obrót stolika mikroskopu o  $360^\circ$ , czy wybrany punkt pozostaje w środku pola widzenia (miejscu przecięcia się nitek pajęczych okularu).

Jeśli ten punkt w dalszym ciągu zatacza krąg (zwykle jest to krąg mniejszy od obserwowanego uprzednio), to procedurę centrowania należy powtórzyć aż do uzyskania scentrowania mikroskopu.



Ważnym elementem obsługi mikroskopu jest ustalenie, jakie ma być zastosowane powiększenie. Względną wartość powiększenia mikroskopu określa się, mnożąc przez siebie liczby krotności powiększenia obiektywu i okularu, na przykład:

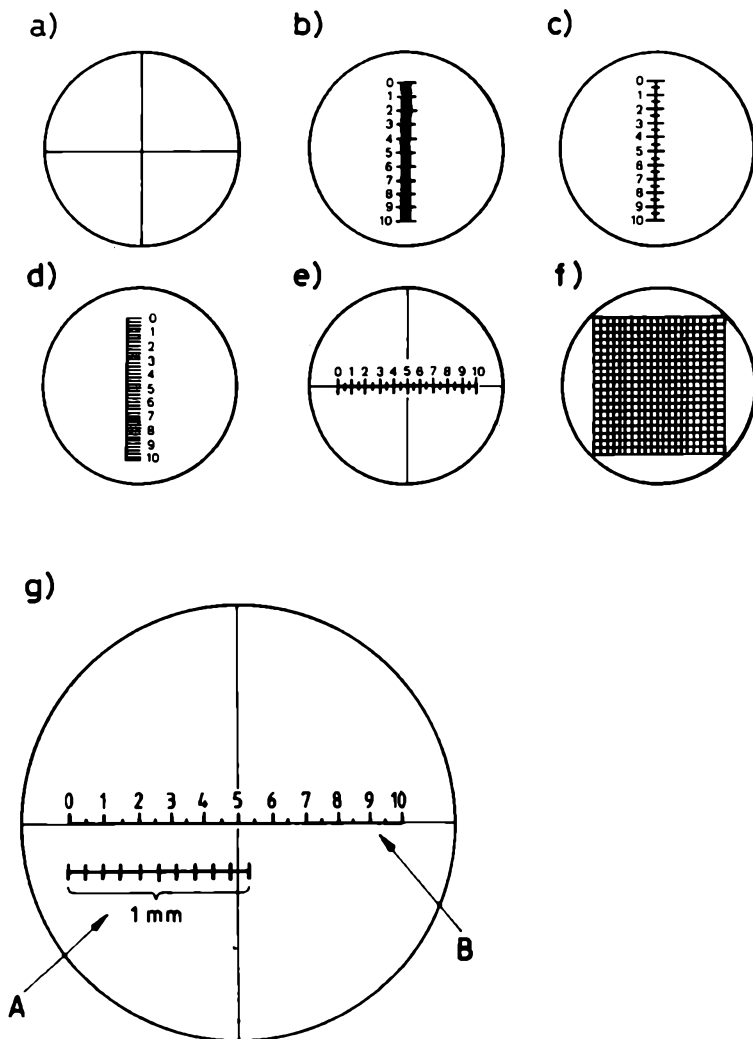
$$40 \times (\text{obiektyw}) \cdot 16 \times (\text{okular}) = 640 \times (\text{powiększenie względne}).$$

Jeśli jeden z elementów tej pary zostanie zmieniony (np. okular lub obiektyw), to powiększenie względne musi zostać określone ponownie.

Bezwzględną wartość powiększenia mikroskopu ustala się przez kalibrację każdej używanej kombinacji obiektywu i okularu. W tym celu na stoliku mikroskopu należy umieścić mikrometr przedmiotowy z wzorcem liniowym (np. 1 mm podzielonego na 100 równych części), a w okularze podziałkę liniową (okular mikrometryczny) lub powierzchniową (okular siatkowy). Przez zwykłe porównanie ilości działek skali wzorcowej (z mikrometru przedmiotowego) pokrywających się całkowicie z pewną liczbą działek skali kalibrowanej (umieszczonej w okularze mikrometrycznym) można wyliczyć wartość powiększenia bezwzględnego (rys. 46). Na przykład: gdy 4 działki skali wzorcowej, każda o wartości 0,01 mm, pokrywają się z 2 działkami skali kalibrowanej z okularu mikrometrycznego (dla danej pary okular — obiektyw), wtedy działka skali kalibrowanej z okularu mikrometrycznego będzie miała wartość 0,02 mm, bo 0,04 mm skali wzorcowej pokrywa się z 2 działkami skali kalibrowanej.

Przed przystąpieniem do obserwacji mikroskopowych należy sprawdzić dokładność skrzyżowania polaryzatora i analizatora oraz określić położenie płaszczyzny drgań przynajmniej jednego z nikoli względem nitek pajęczych okularu. Położenie płaszczyzny drgań nikoli ustala się następująco:

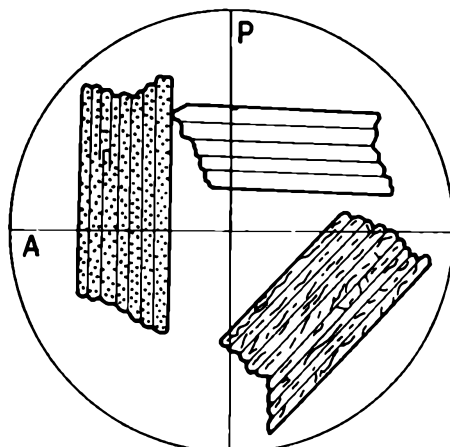
a) przez użycie preparatu mikroskopowego zawierającego biotyt, turmalin lub anhydryt; po wyłączeniu analizatora ustawia się śladami płaszczyzn łupliwości (biotyt, anhydryt) lub śladami ścian słupa (turmalin) przekrój minerału zgodnie z pionową lub poziomą krzyżą nitek pajęczych okularu; w takim położeniu przekrój biotyту będzie wykazywał najciemniejszą, a turmalinu najjaśniejszą barwę pleochroiczną lub odwrotnie, natomiast kierunek śladów płaszczyzn łupliwości lub śladów ścian słupa wskaże kierunek polaryzacji polaryzatora lub kierunek doń prostopadły; po zdjęciu preparatu mikroskopowego obrotem analizatora doprowadza się do całkowitego ściemnienia pola widzenia; pełne wygaszenie pola widzenia wskazuje, że nikole są skrzyżowane (rys. 47); w konsekwencji korektę położenia nitek pajęczych okularu można dokonać względem śladów płaszczyzn łupliwości biotyту lub ścian słupa turmalinu;



Rys. 46. Okulary mikrometryczne (a — z krzyżem nici pajęczych, b, c, d, e — z podziałkami mikrometrycznymi, f — z siatką) oraz określanie powiększenia bezwzględnego mikroskopu (g):

A — skala wzorcową (z mikrometru przedmiotowego), B — skala kalibrowana (z okularu mikrometrycznego)

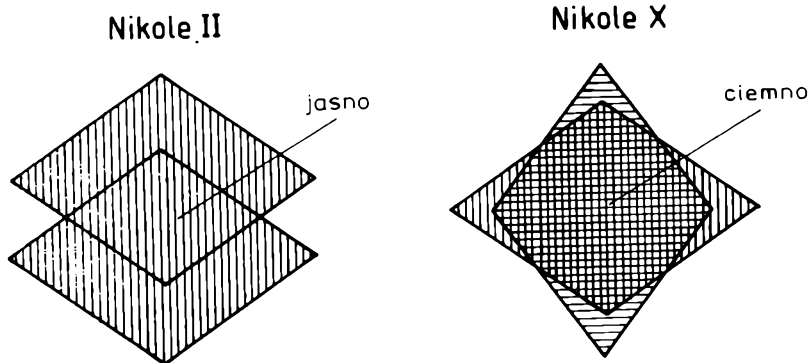
b) przez wyjęcie polaryzatora lub analizatora i obserwację za jego pomocą światła odbitego od powierzchni dielektryka (np. blatu stołu, tafli szkła); obracając w palcach polaryzator lub analizator, doprowadzamy do największego możliwego wygaszenia światła odbitego od powierzchni dielektryka; w takim położeniu płaszczyzna drgań nikola jest prostopadła do płaszczyzny odbijającej światło; oznaczywszy ją, możemy określić płaszczyznę drgań dru-



Rys. 47. Ustalenie położenia płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora za pomocą biotyту:

P — płaszczyzna drgań polaryzatora, A — płaszczyzna drgań analizatora

giego nikola; nikole złożone ze sobą w położeniu największego ściemnienia mają płaszczyzny polaryzacji wzajemnie prostopadłe (rys. 48). Nadzwyczaj



Rys. 48. Wygaszanie i przepuszczanie światła przez polaroidy(nikole)

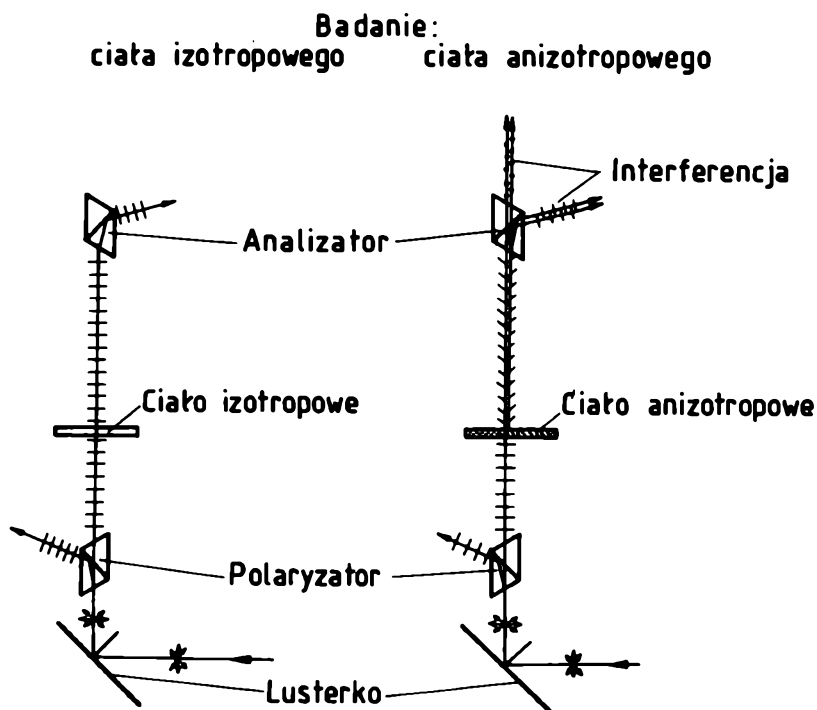
czułą na odchylenia od prostopadłego skrzyżowania nikoli jest tzw. płytka Nakamury, składająca się z dwóch sklejonych ze sobą płytek kwarcu jednakowej grubości, odpowiednio, lewo- i prawoskręcających światło. Jeśli nikole są skrzyżowane, to obie płytki są jednakowo rozjaśnione, a jeśli skrzyżowanie jest minimalnie naruszone, to jedna z płytek jest ciemniejsza, a druga jaśniejsza.

## 18.4. Droga światła w mikroskopie polaryzacyjnym

Emitowane ze źródła światła (żarówka halogenowa, lampa łukowa) fale elektromagnetyczne drgają we wszystkich możliwych kierunkach (azymutach) i reprezentują różne możliwe długości fal widma światła białego. Jest to światło niespolaryzowane.

Po przejściu przez polaryzator azymuty drgań fal elektromagnetycznych zostają uporządkowane w jednej płaszczyźnie, zwanej płaszczyzną polaryzacji. Kierunek tej płaszczyzny odwzorowuje w okularze pionowa albo pozioma nić krzyża pajęczego. Dla oka obserwatora światło spolaryzowane nie różni się od światła niespolaryzowanego. Wiązka światła docierając do leżącego na stoliku mikroskopu preparatu (przekroju kryształu), składa się z promieni równoległych, spolaryzowanych, drgających w płaszczyźnie zgodnej z płaszczyzną drgań polaryzatora (rys. 49). Leżący na stoliku mikroskopu preparat zazwyczaj jest płytką krystaliczną minerału izotropowego albo minerału anizotropowego.

Przechodząc przez przekrój kryształu izotropowego, światło spolaryzowane nie ulega podwójnemu załamaniu i bez zmian dociera poprzez obiektyw

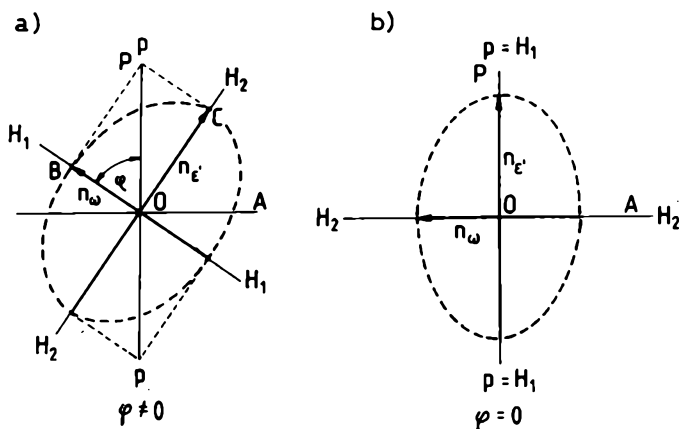


Rys. 49. Bieg światła w mikroskopie petrograficznym

do analizatora. Kierunek drgań analizatora odwzorowuje zwykle pozioma nić krzyża pajączego okularu. Jeśli analizator skrzyżuje się z polaryzatorem ( $\neq 90^\circ$ ), to pole widzenia będzie całkowicie ściemnione, gdyż w analizatorze światło spolaryzowane (drżące w płaszczyźnie prostopadłej) zostanie potraktowane tak, jak promień zwyczajny w pryzmacie Nicola. Jeśli analizator jest wyłączony, to pole widzenia jest całkowicie rozjaśnione. Zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku pełna rotacja przekroju kryształu izotropowego wokół osi optycznej mikroskopu nie zmienia charakteru pola widzenia (odpowiednio całkowicie ściemnionego lub rozjaśnionego).

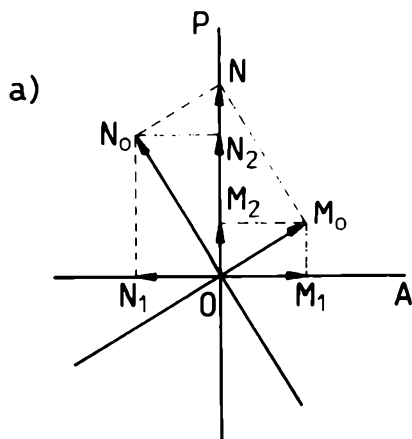
Światło spolaryzowane, przechodząc przez przekrój kryształu anizotropowego, ulega podwójnemu załamaniu i dociera poprzez obiektyw do analizatora. Jeśli analizator jest włączony i dokładnie skrzyżowany z polaryzatorem, to pole widzenia może być w tym momencie rozjaśnione lub ściemnione. Obrotem stolika mikroskopu o  $360^\circ$  można doprowadzić do czterokrotnego rozjaśnienia i ściemnienia przekroju dokładnie co  $90^\circ$ . Jeśli analizator jest wyłączony, to pole widzenia pozostaje rozjaśnione także przy rotacji tego przekroju.

Fale elektromagnetyczne przechodzące przez umieszczoną na stoliku mikroskopu anizotropową płytkę krystaliczną nie mogą drgać dowolnie. Azymuty drgań fal powstałych w wyniku podwójnego załamania są ściśle określone położeniem przekroju eliptycznego indyktrisy. Drgania fal powstałych w wyniku podwójnego załamania w przekroju kryształu są względem siebie prostopadłe i zgodne z kierunkiem najdłuższej i najkrótszej osi przekroju eliptycznego indyktrisy (rys. 50.A).

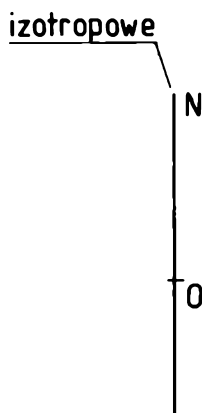
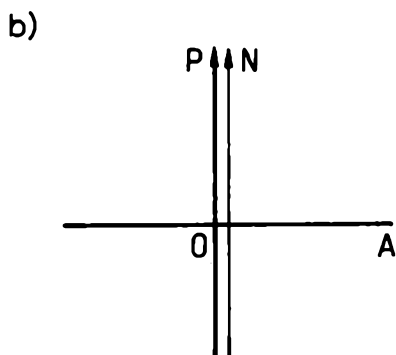
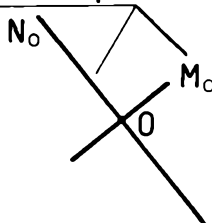


Rys. 50.A. Reakcje optyczne w płytce krystalicznej między skrzyżowanymi nikolami:

P, A — płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora: a) w położeniu rozjaśnienia światła drżania światła wychodzące z polaryzatora (OP) ulegają podwójnemu załamaniu ( $OH_1$  i  $OH_2$ ) lub b) w położeniu ściemnienia światła przechodzą bez zmiany



Płaszczyzny drgań światła spolaryzowanego OP po przejściu przez ciało anizotropowe



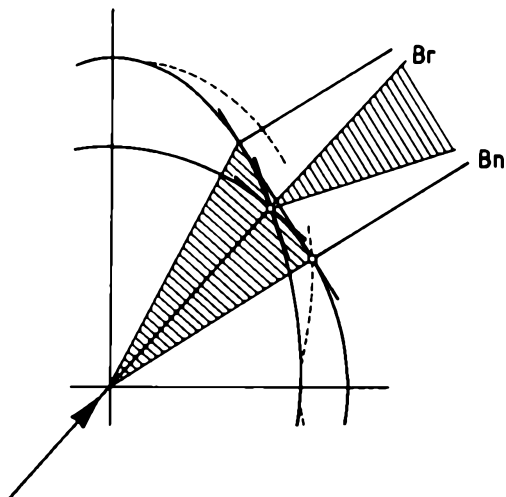
Rys. 50.B. Reakcje optyczne towarzyszące przejściu światła przez analizator.

a) po przejściu przez przekrój kryształu znajdującego się w położeniu rozjaśniania światła, b) po przejściu przez przekrój kryształu znajdującego się w położeniu ściemnienia światła;

ON — drgania światła wychodzącego z polaryzatora,  $ON_0$ ,  $OM_0$  — drgania światła wychodzącego z przekroju płytki krystalicznej leżącej na stoliku mikroskopu,  $ON_1$ ,  $ON_2$ ,  $OM_1$ ,  $OM_2$  — drgania światła zachodzące w analizatorze

Jeśli przekrój indyktrysy płaszczyzną preparatu jest kołem, to w kryształach jednoosiowych fala elektromagnetyczna biegnąca zgodnie z kierunkiem osi optycznej nie rozdwaja się i drgając w nie zmienionym azymucie wytworzonym jeszcze w polaryzatorze dociera do analizatora, gdzie wygasa się, a w kryształach dwuosiowych biegnąc zgodnie z kierunkiem jednej z osi optycznych ulega refrakcji stożkowej; różnym kierunkom promieni tworzących stożek refrakcyjny odpowiadają różne, lecz określone azymuty drgań (rys. 51).

Z tego powodu, mimo włączonego analizatora, pole widzenia pozostaje nieco rozjaśnione podczas rotacji stolikiem o  $360^\circ$ , gdy jest to kryształ niskodwójłomny, większe natomiast rozjaśnienie wykazuje kryształ wysokodwójłomny (np. oliwin).



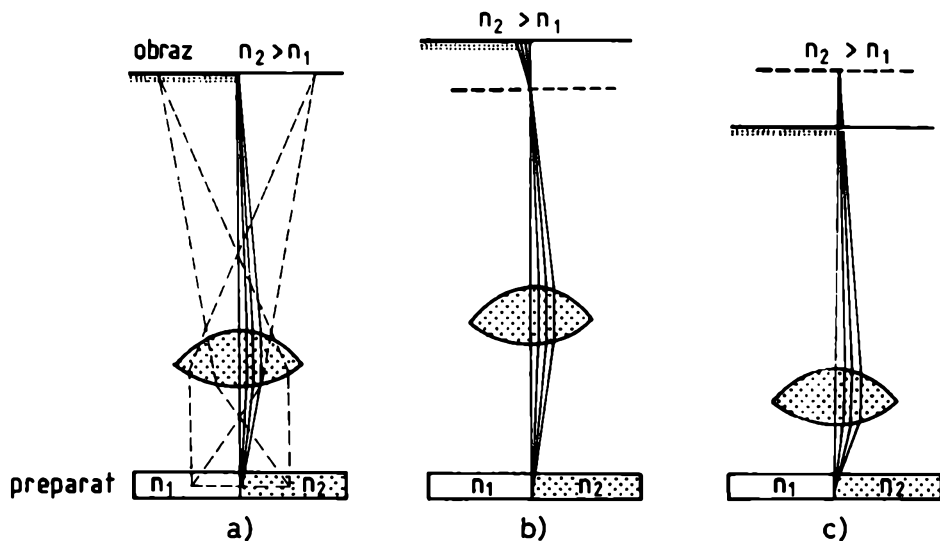
Rys. 51. Refrakcja stożkowa:

$B_r$  — binormalne,  $B_n$  — biradialne

Jeśli azymut drgań fal elektromagnetycznych wytworzony w polaryzatorze pokrywa się z kierunkiem najdłuższej lub najkrótszej osi przekroju eliptycznego indyktrysy, to fala, której drgania zostały uporządkowane w polaryzatorze po przejściu przez taki przekrój kryształu nie zmienia azymutu drgań, gdyż nie ulegnie podwójnemu załamaniu i dotrze nie zmieniona do analizatora, gdzie zostanie wygaszona. W takim położeniu przekroju eliptycznego kryształu względem płaszczyzn drgań polaryzatora i analizatora fala światła spolaryzowanego zostanie potraktowana, zależnie od orientacji przekroju kryształu anizotropowego, bądź jak promień zwyczajny, bądź jak promień nadzwyczajny, bądź też jak jeden z promieni nadzwyczajnych. Rotując preparat mikroskopowy kryształu anizotropowego wokół osi optycznej mikroskopu o  $360^\circ$ , cztery razy natrafiamy na położenie wygaszania światła, gdyż kierunki najdłuższej i najkrótszej osi przekroju eliptycznego indyktrysy określające kierunki drgań fal w tym przekroju zlewają się cztery razy (tj. co  $90^\circ$ ) z kierunkami drgań skrzyżowanych nikoli.

Jeśli azymut drgań fal elektromagnetycznych wytworzony w polaryzatorze nie pokrywa się z kierunkiem najdłuższej lub najkrótszej osi przekroju eliptycznego indyktrysy badanego kryształu, to fala, której drgania zostały uporządkowane w polaryzatorze po przejściu przez tak zorientowany przekrój,

zmieni swój azymut drgań wskutek podwójnego załamania i polaryzacji, przy czym obie powstałe fale będą miały płaszczyzny drgań względem siebie prostopadłe (rys. 50.B). Powstałe fale elektromagnetyczne docierają do analizatora, gdzie każda z nich ponownie ulega podwójnemu załamaniu i polaryzacji,



Rys. 52. Bieg promieni światła w mikroskopie petrograficznym podczas powstawania smugi Beckego:

a) preparat mikroskopowy ustawiony na ostre widzenie konturu (smuga Beckego nie jest widoczna), b) stolik mikroskopu nieco obniżony w stosunku do położenia ostrego widzenia konturu (smuga Beckego przesuwa się w stronę środowiska o większej gęstości optycznej), c) stolik mikroskopu nieco podniesiony w stosunku do położenia ostrego widzenia konturu (smuga Beckego przesuwa się w stronę środowiska o mniejszej gęstości optycznej)

gdyż żadna z fal powstałych w tak zorientowanym przekroju kryształu anizotropowego nie jest równoległa do płaszczyzny drgań analizatora. W wyniku podwójnego załamania tworzą się w analizatorze dwie fale o drganiach prostopadłych do płaszczyzny drgań analizatora i dwie fale o drganiach równoległych do płaszczyzny drgań analizatora (rys. 50.B). Fale prostopadłe do płaszczyzny drgań analizatora ulegają całkowitemu wygaszeniu, natomiast fale równoległe do płaszczyzny drgań analizatora przechodzą, rozjaśniając pole widzenia. Rotując preparat mikroskopowy wokół osi optycznej mikroskopu o  $360^\circ$ , cztery razy zaobserwujemy zjawisko rozjaśnienia pola widzenia, gdyż kierunki najdłuższej i najkrótszej osi przekroju eliptycznego indyktrisy, określające kierunki drgań fal badanego przekroju, cztery razy znajdą się w położeniach diagonalnych w stosunku do kierunków drgań skrzyżowanych nikoli (polaryzatora i analizatora).

Rotując zatem przekrój ciała anizotropowego o  $360^\circ$  wokół osi optycznej mikroskopu, przy skrzyżowanych nikolach, naprzemiennie będziemy natra-



fali na położenia wygaszenia i rozjaśnienia światła, przy czym wygaszenia będą się powtarzały dokładnie co  $90^\circ$ . Tylko przekroje prostopadłe do osi optycznej pozostaną w trakcie takiej rotacji wygaszone (kryształy jednoosiowe) lub nieco rozjaśnione (refrakcja stożkowa — kryształy dwuosiowe).

Natężenie wiązki światła wychodzącej z analizatora jest największe wtedy, gdy kierunek drgań promieni przechodzących przez przekrój kryształu tworzy kąt  $\alpha = 45^\circ$  z kierunkiem drgań polaryzatora i analizatora. Gdy kierunek drgań promieni przechodzących przez przekrój kryształu pokryje się z kierunkiem drgań polaryzatora lub analizatora ( $\alpha = 0^\circ$  lub  $\alpha = 90^\circ$ ), wtedy natężenie wiązki światła wychodzącej z analizatora spadnie do zera w myśl wzoru Fresnela:

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \left[ 180 \cdot \Delta' \cdot \frac{d}{\lambda} \right],$$

gdzie:

- $\alpha$  — kąt zawarty między kierunkiem drgań fali przechodzącej przez przekrój i kierunkiem drgań polaryzatora,
- $d$  — grubość przekroju kryształu,
- $\lambda$  — długość fali użytego światła,
- $\Delta'$  — dwójłomność przekroju kryształu,
- $I$  — natężenie strumienia światła po przejściu przez przekrój kryształu i analizator,
- $I_0$  — natężenie strumienia światła wychodzącego z polaryzatora.

## 18.5. Badania w świetle spolaryzowanym przechodzącym równoległym (badania ortoskopowe)

Przyrząd polaryzacyjny składający się z dwóch polaroidów (polaryzatora i analizatora) ustawionych jeden nad drugim nazywamy ortoskopem. Płaszczyzny drgań polaroidów mogą być ustawione względem siebie równolegle (nikole równoległe) lub prostopadłe (nikole skrzyżowane). Analizator może być usunięty z biegu strumienia światła (obserwacja bez analizatora). Obecność ortoskopu różni istotnie mikroskop petrograficzny od biologicznego. Zazwyczaj wykonuje się obserwacje petrograficzne przy nikolach skrzyżowanych lub z wyłączonym analizatorem.

### 18.5.1. Oznaczanie współczynnika załamania światła

Współczynnik załamania światła kryształów i innych substancji przezroczystych można bardzo dokładnie oznaczyć metodą refraktometryczną,

mierząc kąt graniczny refraktometrem lub metodą pryzmatu, mierząc kąt najmniejszego odchylenia albo z zastosowaniem prostopadłego padania wiązki światła na pryzmat. Metodę refraktometryczną wykorzystuje się w kryształach, których współczynnik załamania światła ma mniejszą wartość od współczynnika załamania światła szkła refraktometru. Kryształy o wyższym współczynniku załamania światła mogą być oznaczane metodą pryzmatu — najdokładniejszym sposobem oznaczania wartości współczynnika załamania światła. Jednak w praktyce metody te mają pewne ograniczenia. Mogą być zastosowane do oznaczania współczynnika załamania światła kryształów poddających się szlifowaniu i polerowaniu, z których można wykonać odpowiednio duży pryzmat z oznaczalnymi kierunkami krystalograficznymi i optycznymi, a nadto, szczególnie w przypadku metody pryzmatu, wymagają kryształów dostatecznie przezroczystych. Pomiar współczynników załamania z dokładnością  $\pm 0,001$  w drobnych ziarnach i odłupkach (0,2—2,0 mm) wykonuje się za pomocą stolika igłowego Rosenfelda przymocowanego do stolika obrotowego mikroskopu. Przez obrót igłą, na której końcu jest przyklejony odłupek lub drobne ziarno minerału, zanurzoną w cieczy imersyjnej i przez obrót stolika mikroskopu można odpowiednio zorientować osie indykatrysy i oznaczyć współczynniki załamania światła w jednym ziarnie minerału.

W praktyce mineralogiczno-petrograficznej z powodu ograniczeń stwarzanych przez najczęściej spotykaną wielkość minerałów skałotwórczych (do 2—4 mm) najchętniej posługujemy się metodami przybliżonej, orientacyjnej oceny wartości współczynników załamania światła. Są to mikroskopowe metody oznaczania wartości współczynników załamania światła. Do najbardziej użytecznych i znanych należą metody:

- F. Beckego,
- reliefu,
- „jaszczurowatej powierzchni”,
- imersyjna,
- skośnego oświetlenia,
- de Chaulnesa.

#### 18.5.1.1. Metoda F. Beckego

Mikroskopowa metoda F. Beckego jest oparta na zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia światła od powierzchni granicznej sąsiadujących środowisk. Pozwala stwierdzić, który z dwu przylegających do siebie kryształów lub substancji jest optycznie gęstszy. Tą metodą można dokonać tylko porównania wartości współczynników załamania światła sąsiadujących środowisk. Jednakże znajomość wartości współczynnika załamania światła jednego

z porównywanych środowisk (np. balsamu kanadyjskiego) może być dobrym odniesieniem dla oceny wartości współczynnika załamania światła środowiska sąsiadującego. Jeśli w preparacie mikroskopowym oznaczymy dwie różne pary kryształów zawierające oznaczany kryształ w towarzystwie kryształu o znanej liczbowej wartości współczynnika załamania światła (większej i mniejszej od oznaczanego kryształu), to łatwo ustalimy przedział liczbowy wartości współczynnika załamania światła, w którym mieści się wartość współczynnika załamania światła oznaczanego kryształu. W zależności od możliwości doboru odpowiednich par środowisk oznaczenie wartości współczynnika załamania światła jest mniej lub bardziej precyzyjne.

W celu porównania wartości współczynników załamania światła sąsiadujących środowisk należy:

- badałą granicę środowisk lub wrostek ustawić w centrum pola widzenia,
- nieco przysłonić diafragmą pole widzenia; im mniejsza jest różnica współczynników załamania światła porównywanych środowisk, tym silniejsze powinno być przysłonięcie pola widzenia,
- zwiększyć natężenie światła,
- zastosować obiektyw średnio- lub długoogniskowy, jeśli porównuje się środowiska o dużej różnicy współczynników załamania światła, albo obiektyw krótkoogniskowy, jeśli porównuje się środowiska o małej różnicy współczynników załamania światła,
- włączyć analizator (skrzyżować nikole),
- obrotem stolika mikroskopu doprowadzić porównywane środowisko do całkowitego wygaszenia (dotyczy to środowisk anizotropowych); w tym położeniu przez środowisko przenikają fale światła spolaryzowanego drgające w płaszczyźnie polaryzatora,
- wyłączyć analizator,
- dokonać porównania obu środowisk, wykorzystując kierunek przemieszczania się tzw. smugi Beckego podczas ruchu stolika mikroskopu ku górze lub w dół (w niektórych typach mikroskopów jest ruchomy tubus).

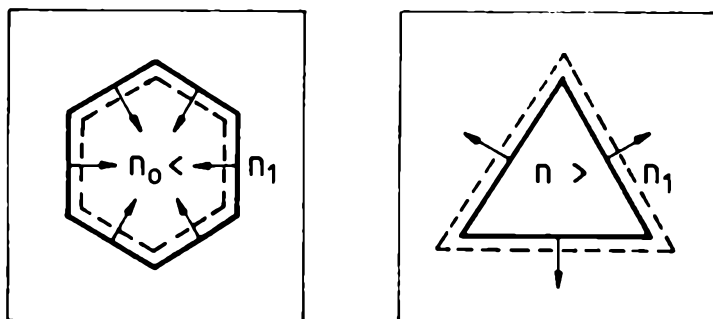
Chcąc zaobserwować sumę Beckego, należy:

- ruchem śruby makro- i mikrometrycznej doprowadzić granicę porównywanych środowisk lub kontur wrostka do ostrego widzenia,
- ruchem śruby mikrometrycznej, przesuwającej stolik mikroskopu (w niektórych typach mikroskopów tubus) w górę albo w dół, spowodować niewielką utratę ostrego widzenia granicy porównywanych środowisk lub konturu wrostka; w tym samym momencie od granicy porównywanych środowisk oderwie się wąska, jasna smuga światła naśladująca kontur tej granicy; jest to tzw. smuga Beckego.

Podwyższając śrubą mikrometryczną stolik mikroskopu, smuga Beckego przesuwa się w stronę środowiska o mniejszej gęstości optycznej (niższej wartości współczynnika załamania światła), a przy obniżaniu stolika mikro-

skopu smuga wędruje w stronę środowiska o większej gęstości optycznej (rys. 52; w niektórych typach mikroskopu polaryzacyjnego, w których obniżany i podwyższany jest tubus mikroskopu, obserwowany efekt jest przeciwny).

Środowiska, których przekroje mieszczą się w centralnej części pola widzenia i są zatopione w innym środowisku (np. wrostki), mogą być porównywane dzięki zjawisku pozornego zwiększania lub zmniejszania zajmowanej powierzchni w trakcie niewielkiego obniżenia lub podwyższenia stolika mikroskopu. Podczas podwyższenia stolika mikroskopu środowisko gęstsze optycznie w stosunku do otoczenia sprawi wrażenie powiększającego zajmowaną powierzchnię, a środowisko rzadsze optycznie — zmniejszającego zajmowaną powierzchnię (rys. 53; w niektórych typach mikroskopu polaryzacyjnego, w których ruchomy jest tubus, obserwowany efekt będzie przeciwny).



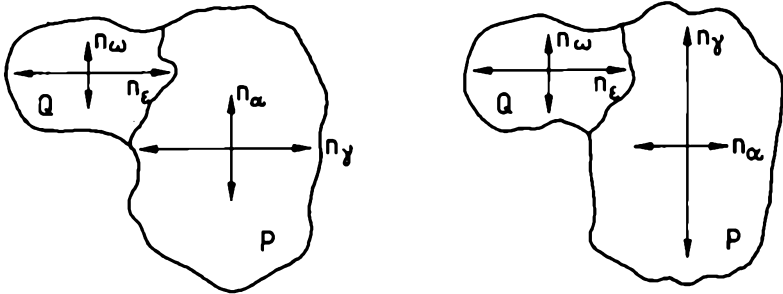
Rys. 53. Zachowanie się smugi Beckego podczas podwyższania stolika mikroskopu (linia przerywana oznacza smugę Beckego)

Inna sytuacja zaistnieje podczas obniżania stolika mikroskopu. Środowisko gęstsze optycznie sprawi wrażenie zmniejszającego powierzchnię, a środowisko rzadsze optycznie — powiększającego powierzchnię.

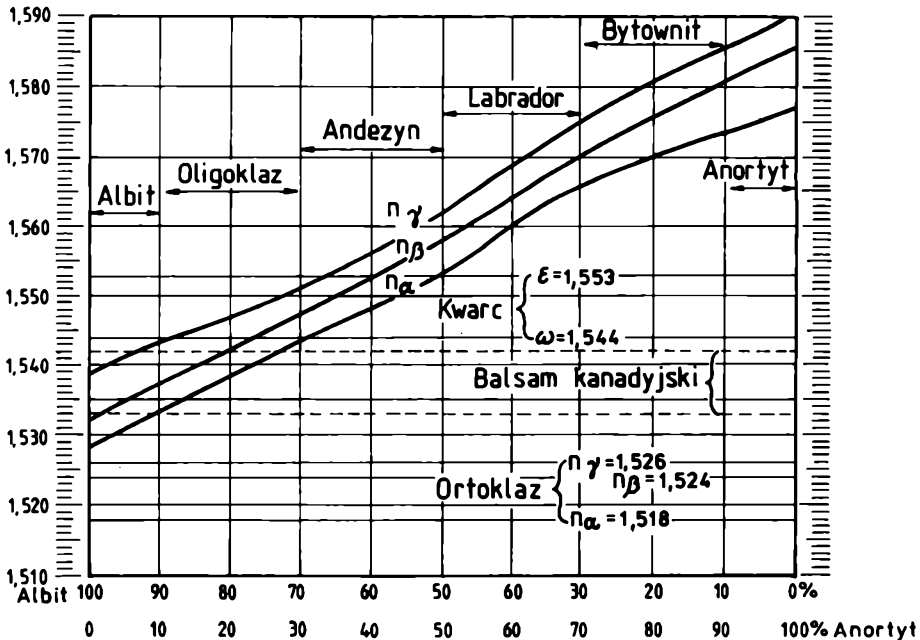
Dokładniejsze porównanie wartości współczynników załamania światła środowisk anizotropowych wymaga wykonania obserwacji smugi Beckego w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach. Po wykonaniu zatem pierwszego porównania współczynników załamania światła należy obrócić stolik mikroskopu z preparatem o  $90^\circ$  i powtórzyć procedurę obserwacji i interpretacji zachowania się smugi Beckego. Oba zbadane azymuty przekroju kryształu reprezentują maksymalną i minimalną wartość współczynnika załamania światła w tym przekroju i są półosiami elipsy powstałej z przecięcia indyktrysy płaszczyzną preparatu mikroskopowego. Jeśli będzie to przekrój prostopadły do osi optycznej, to współczynniki załamania światła tego przekroju nie różnią się.

Chcąc określić wartość współczynników załamania światła kryształu jednoosiowego, wybieramy przekrój równoległy do osi krystalograficznej Z. Jest to przekrój o największej dwójłomności. Natomiast chcąc określić wartość współczynników załamania światła kryształu dwuosiowego, wyszukujemy przekrój kryształu równoległy do płaszczyzny osi optycznych. Jest to również przekrój o największej dwójłomności.

a)



b)



Rys. 54. Współczynniki załamania światła plagioklazów i kwarcu (b) oraz najbardziej przydatne położenie przekrojów kwarcu i plagioklazów do oznaczania w preparatach mikroskopowych (a): Q — kwarc, P — plagioklaz

Dla dokładnych ocen współczynników załamania światła porównywanych kryształów najbardziej przydatne są sytuacje, gdy porównywane przekroje wygaszają równocześnie lub prawie równocześnie. Oznacza to, że azymuty drgań ich przekrojów eliptycznych indykatrysy są względem siebie równoległe. Takie sytuacje wykorzystuje się do przybliżonego określania składu plagioklazów przez porównanie z kwarcem (rys. 54, tab. 2).

Tabela 2

Określenie stosunku zawartości cząsteczki albitowej i anortytowej  
w plagioklazach (wg Beckego)

W położeniu równoległym $n_x \parallel n_o, n_y \parallel n_e$	W położeniu prostopadłym $n_x \perp n_e$	Nazwa plagioklazu	% mol. anortytu
$n_o > n_e$ $n_x > n_y$	$n_o > n_y$ $n_x > n_e$	albit	0—16
$n_o > n_e$ $n_x > n_y$	$n_o = n_y$ $n_x > n_e$	oligoklaz	16—22
$n_o = n_e$ $n_x > n_y$	$n_o > n_y$ $n_x > n_e$	oligoklaz zasadowy	22—29
$n_o > n_e$ $n_x = n_y$	$n_o < n_y$ $n_x > n_e$	andezyn	29—40
$n_o < n_e$ $n_x < n_y$	$n_o < n_y$ $n_x = n_e$	andezyn zasadowy	40—46
$n_o < n_e$ $n_x < n_y$	$n_o < n_y$ $n_x < n_e$	labrador bytownit anortyt	46—100

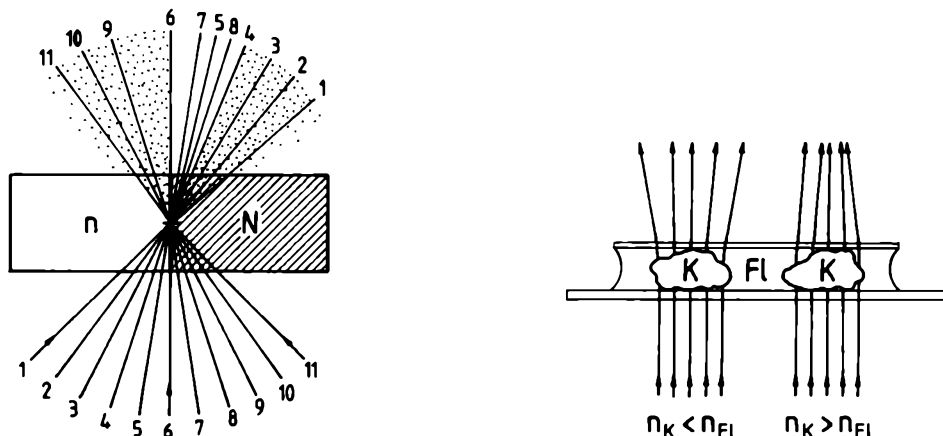
Jeśli współczynniki załamania światła sąsiadujących środowisk są jednakowe lub tylko nieznacznie się różnią (np. na trzecim lub czwartym miejscu po przecinku), to smuga Beckego nie pojawia się lub jest bardzo niewyraźna, słabo widoczna.

Przyczyną tworzenia się smugi Beckego jest zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia od powierzchni granicznej porównywanych środowisk (rys. 55), która jest ustawiona prostopadle lub prawie prostopadle do powierzchni preparatu mikroskopowego, a stycznie do strumienia światła wędrującego zgodnie z osią optyczną mikroskopu. Promienie biegnące od strony środowiska o mniejszym współczynniku załamania światła przekraczają granicę środowiska o większym współczynniku załamania światła bez trudu, w części załamując się. Promienie biegnące od strony środowiska o większej gęstości optycznej ulegają natomiast całkowitemu wewnętrznemu odbiciu, gdyż padają na granicę środowisk pod kątem większym od granicznego (patrz rozdz. 4). Od strony środowiska gęstszego optycznie skupia się więcej promieni świetlnych. Powoduje to powstanie smugi Beckego. Przesuwając stolik mikroskopu powyżej lub poniżej poziomu maksymalnego wyostrenia konturu granicy

porównywanych środowisk, w rezultacie można obserwować odrywającą się odpowiednio po jednej lub drugiej stronie konturu stopniowo rozplywającą się i tracącą kontrast smugę Beckego (rys. 52).

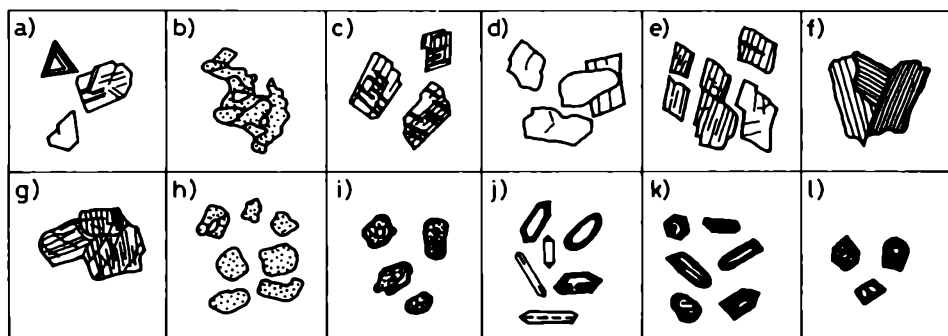
### 18.5.1.2. Metoda reliefu

Kontur kryształu zanurzonego w cieczy jest tym wyraźniejszy, im większa jest różnica współczynników załamania światła kryształu i jego otoczenia. Zjawisko to wykorzystuje się do porównywania i względnej oceny współczynników załamania światła w preparatach mikroskopowych. Różnica współczynników załamania światła kryształu i jego otoczenia wyraża się zjawiskiem reliefu (rys. 55.1).



Rys. 55a. Powstawanie smugi Beckego wskutek całkowitego odbicia na granicy dwóch środowisk optycznych:

$n$  — środowisko rzadsze,  $N$  — środowisko gęstsze



Rys. 55b. Relief niektórych minerałów w balsamie kanadyjskim:

a) fluoryt, b) opal, c) mikroklin, d) kwarc, e) anortyt, f) muskowit, g) piroksen, h) oliwin, i) granat, j) cyrkon, k) rutyl, l) kasyteryt  
(kierunek wzrostu reliefu: od a do l)

Relief przejawia się złudzeniem optycznym polegającym na pozornym wystawianiu ponad powierzchnię preparatu (relief dodatni) lub pozornym zagłębieniu w powierzchnię preparatu (relief ujemny) przekroju minerału różniącego się wartością współczynnika załamania światła od swego otoczenia. Zjawisko to jest tym wyraźniejsze, im większa jest różnica współczynników załamania światła między przekrojem i jego otoczeniem.

Z reliefem koreluje kontur przekroju kryształu. Im większa jest różnica współczynników załamania światła między przekrojem i jego otoczeniem, tym kontur przekroju jest wyraźniejszy, zarysowany mocniejszą i grubszą linią.

Odróżnienie reliefów dodatnich i ujemnych, szczególnie dla początkującego obserwatora, nie zawsze jest łatwe, lecz poprawność wykonanej obserwacji można sprawdzić metodą F. Beckego. Obserwacji reliefu dokonuje się najdogodniej przy nieco zmniejszonym natężeniu strumienia światła (przymkniętej diafragmie lub nieco opuszczonym oświetlaczu) z wyłączonym analizatorem.

Biorąc za kryterium relief w balsamie kanadyjskim, dokonano podziału reliefów minerałów na:

a) reliefy dodatnie:

- nadzwyczaj silne ( $n > 2,0$ ; np. rutil, anataz, brookit),
- bardzo silne ( $2,0 > n > 1,8$ ; np. cyrkon, tytanit, niektóre granaty, egiryn, syderyt, fajalit),
- silne ( $1,8 > n > 1,7$ ; np. niektóre granaty, zoizyt, korund, staurolit, hipersten, dysten, magnezyt, epidot, lamprobolit, augit egirynowy),
- dość silne ( $1,7 > n > 1,65$ ; np. kalcyt, dolomit, augit, enstatyt, bronzyt, turmaliny, forsteryt, diopsyd, syllimanit),
- średnie ( $1,65 > n > 1,60$ ; np. apatyt, szamozyt, andaluzyt, topaz, celestyn, baryt, wollastonit, glaukofan, hornblenda, prehnit, biotyt, aktynolit, tremolit),
- słabe ( $1,6 > n > 1,54$ ; np. pennin, kwarc, plagioklasy, kordieryt, kaolinit, klinochlor, muskowit, talk, anhydryt, halit, illit, hydrargilit, skapolity),

b) reliefy pośrednie (bliskie reliefowi balsamu kanadyjskiego):

- bardzo słabe dodatnie lub ujemne ( $1,54 > n > 1,52$ ; np. nefelin, skałek potasowy, gips, chalcedon),

c) reliefy ujemne:

- słabe ( $1,52 > n > 1,46$ ; np. sylwin, skaleniewce, zeolity, montmorillonit, szkliwo wulkaniczne),
- średnie ( $n < 1,46$ ; np. opal, fluoryt).

Przekroje kryształów anizotropowych wykazują zmienny relief. Zjawisko to jest najbardziej wyraziste w minerałach charakteryzujących się dużą różnicą współczynników załamania światła, czyli silnie dwójłomnych (np. węglany, saletra chilijska) zwłaszcza w przekrojach równoległych do osi optycznej (kryształy jednoosiowe) lub prostopadłych względem normalnej optycznie



(kryształy dwuosiove). Polega ono na zauważalnej zmianie reliefu przekroju minerału anizotropowego podczas rotacji preparatu stolikiem mikroskopu. Ocena wyrazistości zmiany reliefu przekroju minerału wymaga porównania reliefu, gdy przez przekrój przenikają fale spolaryzowane drgające w płaszczyźnie polaryzatora z reliefem, gdy przez przekrój przenikają fale spolaryzowane drgające w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny drgań polaryzatora. Oba azymuty przekroju kryształu reprezentują zatem maksymalną i minimalną wartość współczynnika załamania światła w tym przekroju i są zgodne z półosiami elipsy powstałej z przecięcia bryły optycznej kryształu (indykat-rysy) płaszczyzną preparatu mikroskopowego.

Aby dokonać oceny zmiennego reliefu, należy:

- włączyć analizator,
- rotacją stolika mikroskopu doprowadzić przekrój minerału anizotropowe-  
go do całkowitego wygaszenia,
- wyłączyć analizator,
- dokonać oceny reliefu przekroju kryształu,
- wykonać rotację preparatu mikroskopowego stolikiem mikroskopu o  $90^\circ$ ,  
obserwując zmieniający się jednocześnie mniej lub bardziej relief przekroju  
kryształu i dokonać jego oceny; zmienny relief jest wykorzystywany jako  
jedna z ważnych cech identyfikacyjnych minerałów o silnej dwójłomności  
(np. węglanów).

#### 18.5.1.3. Metoda „jaszczurowatej powierzchni”

Przy dostatecznie dużej różnicy współczynników załamania światła badanego mikroskopowo środowiska i jego otoczenia na powierzchni prze-kroju powstaje „jaszczurowata powierzchnia”. Charakteryzuje się ona obec-nością licznych drobnych nierówności, chropowatości i zadziorowatości widocznych mikroskopowo, powstałych w trakcie przygotowywania preparatu (ścierania), zakłócających i ograniczających bieg strumienia światła. Im różnica współczynników załamania światła badanego mikroskopowo środowiska i jego otoczenia jest większa, tym większa wyrazistość „jaszczurowatej po-wierzchni”.

Dla minerałów zatopionych w balsamie kanadyjskim pierwsze, niezbyt wyraźne oznaki „jaszczurowatej powierzchni” występują, gdy współczynnik załamania światła minerału mieści się w przedziale od 1,6 do 1,65 (np. andaluzyt, apatyt, topaz, baryt) lub od 1,46 do 1,52 (np. niektóre zeolity i skaleniewce). Nieco wyraźniejsza „jaszczurowata powierzchnia” występuje u minerałów, których współczynnik załamania światła zawiera się w przedziale 1,65—1,7 (np. oliwiny, pirokseny, węglany). Najwyraźniejszą, łatwo zauważalną „jaszczurowatą powierzchnię” mają przekroje minerałów, których współczyn-

nik załamania światła jest większy od 1,7 lub mniejszy od 1,46 (np. granaty, spinele, staurolit, magnezyt, syderyt, epidot, tytanit, opal, fluoryt). „Jaszczurowata powierzchnia” jest uwarunkowana także w pewnym stopniu twardością i polerowalnością minerału. Stąd też minerały mające podobny współczynnik załamania światła mogą się różnić wyrazistością i morfologią „jaszczurowatej powierzchni”. Dlatego „jaszczurowatą powierzchnię” należy uwzględnić w identyfikacji minerałów jako indywidualną, swoistą cechę.

#### 18.5.1.4. Metoda imersyjna

Metoda ta wykorzystuje i łączy zalety metody Beckego i reliefu. Polega ona na określeniu pod mikroskopem wartości współczynnika załamania światła okruchu minerału zanurzonego w cieczy o znanej wartości współczynnika załamania światła (tzw. cieczy imersyjnej, tab. 3). Ziarno mineralne o określonej

Tabela 3

Wartości współczynnika załamania światła niektórych cieczy imersyjnych

Nazwa cieczy	$n$ (20° C)	Temperatura wrzenia (°C)	Nazwa cieczy	$n$ (20° C)	Temperatura wrzenia (°C)
Woda (H <sub>2</sub> O)	1,333	100	olejek sandałowowy	1,508	
Alkohol etylowy	1,362	78	monochlorobenzen	1,525	132
Heksan	1,375	69	bromek etylenu	1,539	131
Alkohol propylowy	1,385		olejek goździkowy	1,544	
Alkohol izo-amyłowy	1,407	130	balsam kanadyjski	1,545	
Paraldehyd	1,420	128	kreozol	1,546	
Monochlorooctan etylu	1,421	143	<i>o</i> -nitrotoluen	1,542	
Dwuchlorooctan etylu	1,439	155	nitrobenzen	1,552	207
Chloroform	1,446	61	bromobenzen	1,560	155
Czterochlorek węgla	1,460	76	benzoesan benzylu	1,569	324
Olejek lawendowy	1,463	188	<i>o</i> -toluidyna	1,573	200
Olejek bergamotowy	1,465		anilina	1,585	184
Nafta	1,45—1,47		<i>o</i> -chloroanilina	1,589	209
Gliceryna	1,473	290	bromoform	1,598	149
Terpentyna	1,47	160	olejek cynamonowy	1,60	
Olejek migdałowy	1,475		jodobenzen	1,620	186
Olej lniany	1,48		<i>m</i> -bromoanilina	1,626	251
Olej rycynowy	1,49	265	chinolina	1,627	238
Toluen	1,497	111	czterobromoetan	1,628	112
Benzen	1,501	80	dwusiarczek węgla	1,63	46
Olejek cedrowy	1,503		$\alpha$ -chloronaftalen	1,633	263
Olejek anyżkowy	1,504		$\alpha$ -bromonaftalen	1,658	281
<i>o</i> -ksylen	1,505	144	$\alpha$ -jodonaftalen	1,702	305
			jodek metylenu	1,74	181

wartości współczynnika załamania światła zanurzone w cieczy immersyjnej o takim samym współczynniku załamania światła nie wykazuje reliefu (kontury są niewidoczne) i smugi Beckego, ale tylko w świetle monochromatycznym. W świetle białym występuje na granicy obu środowisk efekt chromatyczny; podczas podnoszenia tubusa mikroskopu wędruje do wnętrza kryształu smuga czerwona, a do cieczy immersyjnej — smuga niebieskozielona, co odpowiada zrównaniu współczynników w świetle sodowym. Im większa jest różnica współczynników załamania światła ziarna mineralnego i cieczy immersyjnej, tym wyraźniejszy jest relief i smuga Beckego.

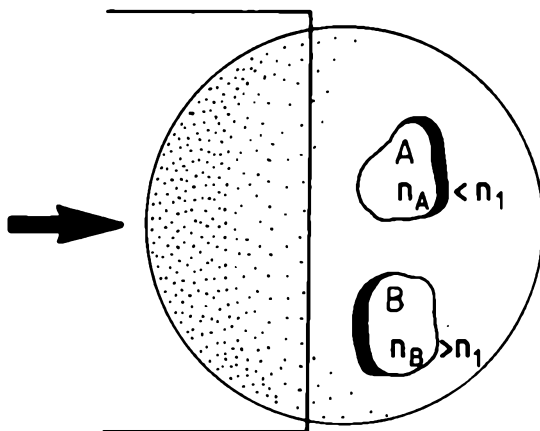
Współczynnik załamania światła cieczy immersyjnej może być łatwo i precyzyjnie oznaczony refraktometrycznie lub metodą pryzmatu (przez napełnienie pryzmatu cieczą immersyjną). Szczególnie użyteczny do tego celu jest refraktometr Jelleya wyposażony w pusty pryzmat do cieczy immersyjnej o objętości około 2 mm<sup>3</sup>, umożliwiający pomiar w zakresie od 1,116 do 2,353 lub od 1,333 do 1,920 z dokładnością  $\pm 0,001$ .

Jako ośrodek immersyjny używa się całego zestawu cieczy różniących się współczynnikami załamania światła (tab. 3). Do tego celu najlepsze są ciecze zmieniające współczynnik załamania światła w miarę rozcieńczania, proporcjonalnie do stopnia rozcieńczenia.

Do badań immersyjnych wykorzystuje się zwykle okruszy mineralne o wielkości od 0,05 mm do 0,5 mm. Z materiału okruszowego wykonuje się preparaty proszkowe (ziarnowe), których lepiszczem jest ciecz immersyjna. Przy dostatecznej staranności można tą metodą oznaczyć współczynnik załamania światła z dokładnością do trzeciego, a w wyjątkowych okolicznościach do czwartego miejsca po przecinku.

#### 18.5.1.5. Metoda skośnego oświetlenia

Jest to wariant metody immersyjnej. Polega na obserwacji zachowania się konturu zanurzonego w cieczy immersyjnej ziarna mineralnego przy częściowym przesłonięciu strumienia światła biegnącego zgodnie z osią optyczną mikroskopu. Częściowe przysłonięcie światła osiąga się, wsuwając w bieg strumienia światła oprawkę analizatora, płytki pomocniczej lub niewielką kartkę papieru. Przeszkoda ta może być wprowadzona w bieg strumienia światła poprzez szczelinę dla płytek pomocniczych lub tuż pod stolikiem mikroskopu. Przysłonięcie powoduje wytworzenie się na konturze ziarna pogrubionego cienia. Jeśli współczynnik załamania światła obserwowanego ziarna jest większy od współczynnika załamania światła cieczy immersyjnej, to cień wystąpi na krawędzi ziarna od strony wsuwanej w bieg światła przeszkody, jeśli mniejszy — po stronie przeciwnej (rys. 56).



Rys. 56. Metoda skośnego oświetlenia

Chcąc skutecznie dokonać obserwacji w warunkach skośnego oświetlenia, należy:

- wybrać ziarno o owalnym, wypukłym kształcie, którego wielkość mieści się w przedziale od 0,05 mm do 0,2 mm (ziarno płaskie o pokroju cienkiej płytki lub blaszki jest nieprzydatne — zjawisko cienia jest niezauważalne),
- użyć obiektywu średnioogniskowego (z zastosowaniem obiektywu krótkoogniskowego zjawisko cienia jest niezauważalne).

Powstanie cienia na konturze owalnego, wypukłego ziarna mineralnego uzasadnia się usunięciem przez przeszkodę najsilniej załamanych brzegiem ziarna promieni, czyli najbardziej odchylonych od biegu strumienia światła w mikroskopie. Owalne, wypukłe ziarno mineralne działa jak soczewka skupiająca, gdy współczynnik załamania światła ziarna jest większy od współczynnika załamania światła cieczy imersyjnej lub jak soczewka rozpraszająca — w sytuacji odwrotnej.

#### 18.5.1.6. Metoda de Chaulnesa

Metoda jest stosowana w preparatach specjalnie grubych. Wyniki uzyskiwane w standardowych preparatach mikroskopowych (o grubości od 0,02 mm do 0,03 mm) nie są dostatecznie dokładne.

Na podstawie analizy geometrycznej drogi wiązki światła w płytce krystalicznej de Chaulnes wykazał, że:

$$d = h \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta},$$

gdzie:

- $d$  — rzeczywista grubość preparatu mikroskopowego,
- $h$  — pozorna grubość preparatu mikroskopowego,
- $\alpha$  — kąt padania promienia wchodzącego do płytki krystalicznej,
- $\beta$  — kąt załamania promienia wchodzącego do płytki krystalicznej.

Pozorną grubość preparatu mikroskopowego określa się różnicą położenia stolika mikroskopu między ostrym widzeniem dolnej i górnej powierzchni preparatu, wyrażającą się wielkością skoku śruby mikrometrycznej mikroskopu (zwykle 1 działka = 0,002 mm). Ponieważ kąt padania i załamania promieni wchodzących do preparatu mikroskopowego jest bardzo mały, stosunek tangensów tych kątów można zastąpić stosunkiem ich sinusów. Ponieważ stosunek sinusów kąta padania i załamania jest równy współczynnikowi załamania światła płytki krystalicznej, więc:

$$n = \frac{d}{h}.$$

### 18.5.2. Wygaszanie światła przez kryształy i pomiar kąta wygaszania

Stan symetrii geometrycznej kryształu, wyrażony mikroskopowo wielobocznym, często regularnym konturem oraz śladami płaszczyzn łupliwości i zbliźniaczeń, pozostaje w ścisłym związku ze stanem symetrii optycznej kryształu, wyrażonym położeniem pozycji wygaszenia światła w stosunku do elementów budowy geometrycznej kryształu.

Wygaszenie światła spolaryzowanego przez przekrój kryształu oznacza, że osie przekroju eliptycznego indyktrisy określające kierunki drgań promieni światła przechodzącego przez ten przekrój są równoległe do kierunku drgań polaryzatora i analizatora. Jeśli mikroskop jest właściwie uregulowany, to kierunki drgań polaryzatora i analizatora odzwierciedla w polu widzenia pionowa (polaryzator) i pozioma (analizator) krzyża nici pajęczych okularu. Tym samym nitki krzyża pajęczego okularu znaczą położenie osi przekroju eliptycznego indyktrisy w wygaszonym przekroju kryształu anizotropowego na tle jego elementów budowy geometrycznej (konturu, śladów płaszczyzn łupliwości i zbliźniaczeń). Zatem elementy budowy geometrycznej przekroju kryształu stanowią swoisty układ odniesienia do oceny położenia pozycji wygaszenia w tym przekroju. Dysponując różnymi przekrojami tego samego minerału, można łatwo określić położenie indyktrisy względem jego głównych kierunków krystalograficznych.

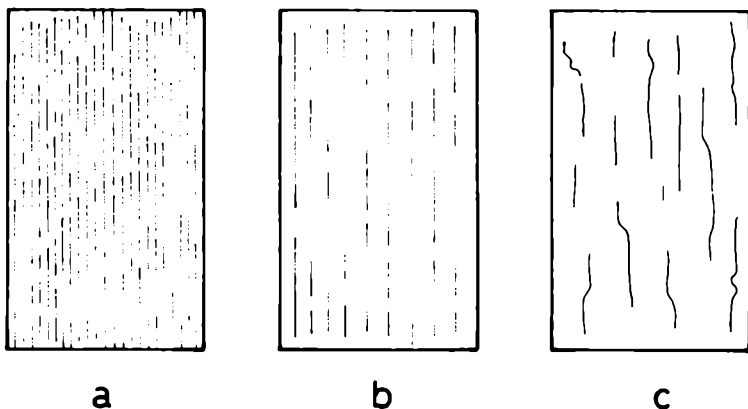
Kontur kryształu jest rezultatem intersekcji bryły geometrycznej kryształu płaszczyzną preparatu mikroskopowego. Najczęściej ma on formę mniej lub

bardziej regularnego wieloboku odwzorowującego pośrednio symetrię geometryczną minerału (zarys jego postaci krystalograficznej). Wynikiem tej samej intersekcji są ślady płaszczyzn łupliwości i płaszczyzn zbliźniaczenia. Łupliwość, powielająca ściany postaci krystalograficznej, nie zawsze pozostaje w widocznym związku z konturem kryształu. Ilość systemów łupliwości zależy od kierunku przecięcia bryły geometrycznej kryształu płaszczyzną preparatu mikroskopowego (np. przekrój prostopadły do dłuższej osi słupa może wykazywać dwa lub trzy systemy łupliwości, podczas gdy przekrój równoległy do dłuższej osi słupa tego samego minerału będzie ujawniał obecność tylko jednego systemu łupliwości). Również wyrazistość mikroskopowa śladów płaszczyzn łupliwości należących do różnych systemów (kierunków) rzadko jest jednakowa (rys. 57.A). Wyrazistość rys łupliwości zależy także od wielkości współczynników załamania światła.

Przekroje minerałów skałotwórczych wykazują zwykle obecność:

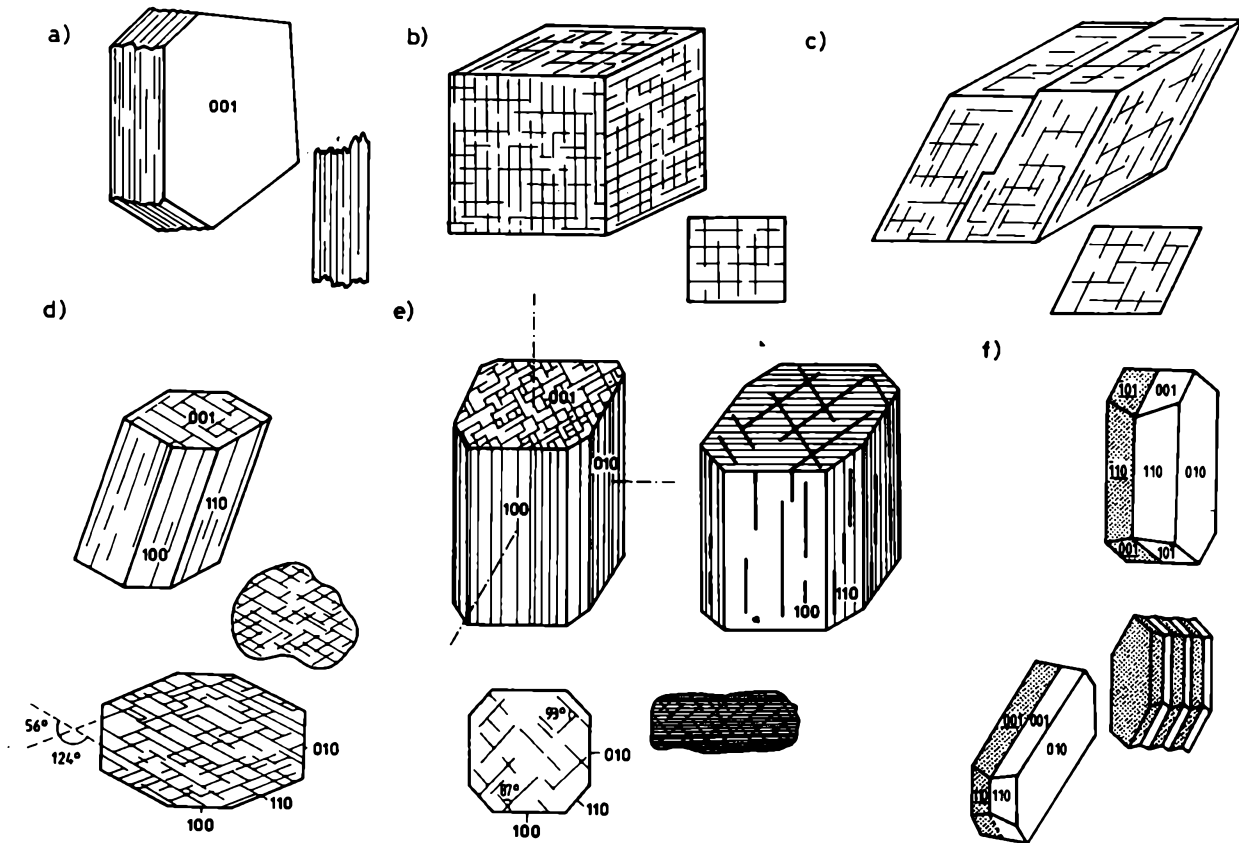
- jednego systemu łupliwości (np. łuszczyki w przekrojach prostopadłych do płaszczyzny 001, pirokseny i amfibole w przekrojach równoległych do osi Z),
- dwu systemów łupliwości (np. kalcyt, dolomit, gips, anhydryt, halit, niektóre pirokseny i amfibole w przekrojach prostopadłych do osi Z) przecinających się pod kątem prostym — ortogonalnie lub kątem ostrym — diagonalnie,
- trzech systemów łupliwości (np. niektóre pirokseny w przekrojach prostopadłych do osi Z ujawniają obecność trzeciego systemu łupliwości, zwanego łupliwością bronzytową — u ortopiroksenów i łupliwością diallagową — u klinopiroksenów), (rys. 57.B).

Spotyka się także przekroje niektórych minerałów nie ujawniające łupliwości (np. przekroje łuszczyków równoległe do płaszczyzny 001).



Rys. 57.A. Ślady płaszczyzn łupliwości:

a) doskonałej, b) wyraźnej, c) niewyraźnej



Rys. 57.B. Łupliwość i zbliźniczenia w kryształach (obserwowane w kryształach i płytce cienkiej):

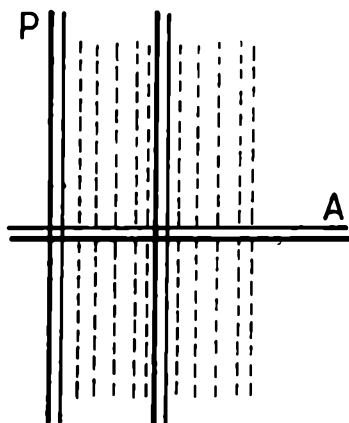
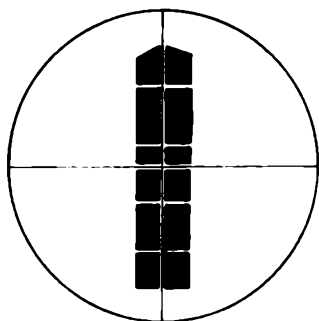
a) jednosystemowa (miki), b) dwusystemowa (ortogonalna — halit), c) dwusystemowa (diagonalna — węglany), d) dwusystemowa (diagonalna — amfibole), e) dwusystemowa (ortogonalna) i trójsystemowa (diagonalna — pirokseny), f) zbliźniczenia (akalenie)

Nieliczna grupa minerałów skałotwórczych wyróżnia się brakiem śladów płaszczyzn łupliwości (np. kwarc). W przekrojach mikroskopowych tych minerałów są widoczne tylko spękania, których ślady przecięcia się z płaszczyzną preparatu przebiegają nieregularnie i niekonsekwentnie.

Ważnym elementem znaczącym stan geometrii kryształu są ślady przecięcia się płaszczyzny zbliźniczenia z płaszczyzną preparatu (tzw. szwy bliźniacze). Niektóre przekroje mogą zawierać wiele powtarzających się szwów bliźniaczych (tzw. zrosty wielokrotne) przecinających się wzajemnie pod różnymi kątami i reprezentujących różne prawa bliźniacze (np. zbliźniczenia skaleni).

Zależnie od wzajemnej relacji elementów budowy geometrycznej i optycznej przekroju kryształu wyróżnia się:

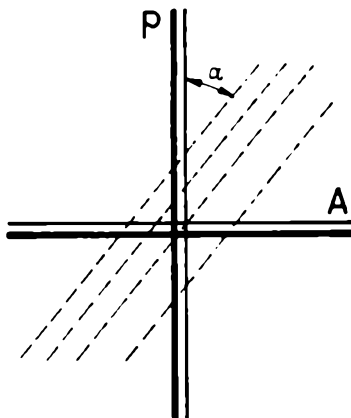
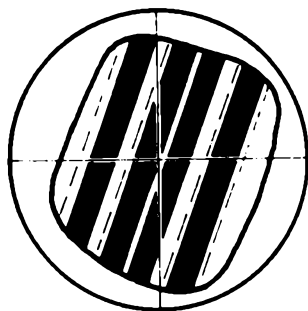
- proste wygaszanie światła, gdy pozycja wygaszenia światła pokrywa się ze śladem ściany kryształu, płaszczyzny łupliwości lub szwu bliźniaczego (rys. 58);



Rys. 58. Proste wygaszanie światła

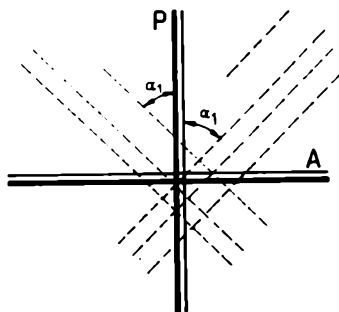
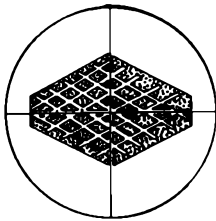
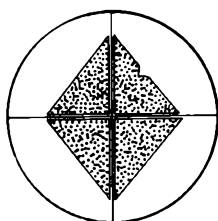
- skośne wygaszanie światła, gdy pozycja wygaszenia światła nie pokrywa się ze śladem ściany kryształu, płaszczyzny łupliwości lub szwem bliźniaczym (rys. 59);
- symetryczne wygaszanie światła, które można uważać za szczególny przypadek wygaszania skośnego, gdy pozycja wygaszenia światła jest dwusieczną kąta tworzonego przez ślady ścian kryształu lub płaszczyzn łupliwości (rys. 60);
- spokojne, jednorodne wygaszanie światła, które zachodzi w przekrojach minerałów nie wykazujących obecności śladów ścian kryształu, płaszczyzn łupliwości lub szwów bliźniaczych (np. ksenomorficzny kwarc), jednocześnie, równomiernie i całkowicie na całej powierzchni przekroju;





Rys. 59. Skośne wygaszanie światła:

$\alpha$  — kąt wygaszania światła



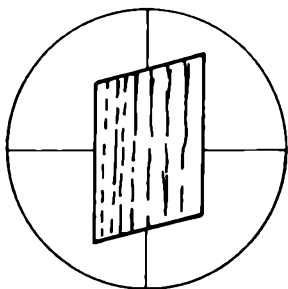
Rys. 60. Symetryczne wygaszanie światła:

$\alpha_1$  — kąty wygaszania światła

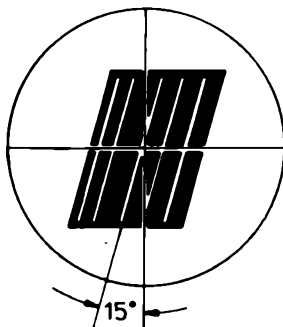
- niespokojne wygaszanie światła, które zachodzi w przekrojach minerałów bez elementów budowy geometrycznej, gdy ściemnienie następuje niejednocześnie na całej powierzchni przekroju; wyróżnia się niespokojne faliste wygaszanie światła, gdy podczas rotacji preparatu przetacza się przez powierzchnię przekroju fala ściemnienia i rozjaśnienia, niespokojne smużyste wygaszanie światła, gdy przez przekrój przetacza się smużysta fala ściemnienia i rozjaśnienia oraz niespokojne mozaikowe wygaszanie światła, gdy przekrój wygasza światło sektorowo (mozaikowo).

Kąt między kierunkiem drgań światła spolaryzowanego przechodzącego przez przekrój minerału anizotropowego bez podwójnego załamania (pozycja wygaszania) i określonym kierunkiem geometrycznym tego przekroju, reprezentowanym przez ślad ściany kryształu, płaszczyznę łupliwości lub szew bliźniaczy, nazywa się kątem znikania (wygaszania, ściemniania) światła i wyraża w stopniach (rys. 61). Żeby zmierzyć kąt znikania światła, należy:

a)



b)



Rys. 61. Pomiar kąta wygaszania światła:

a) pierwszy odczyt położenia przekroju kryształu, b) drugi odczyt położenia przekroju kryształu

- obrotem stolika mikroskopu ustawić wybrany element geometryczny kryształu (ślad ściany kryształu, płaszczyzny łupliwości lub szew bliźniaczy) zgodnie z pionową krzyża nici pajęczych okularu,
- odczytać to położenie na skali kątowej stolika mikroskopu,
- włączyć analizator,
- obrotem stolika mikroskopu doprowadzić przekrój do całkowitego wygaszenia (z ewentualnym wykorzystaniem płytki pomocniczej — patrz rozdz. 18.5.7),
- odczytać to położenie na skali kątowej stolika mikroskopu.

Bezwzględna różnica pierwszego i drugiego odczytu wyrażona w stopniach określa kąt znikania światła w stosunku do wybranego kierunku krytalograficznego. Jeśli kąt znikania światła równy jest  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  lub wielokrotność tej wartości, to jest to wygaszanie proste. Jeśli kąt znikania światła różni się od  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  lub wielokrotności tych wartości, to jest to wygaszanie skośne, które w szczególnym przypadku może być wygaszaniem symetrycznym.

Kryształy jednoosiowe wygaszają:

- prosto względem ścian słupa i dwuścianu podstawowego,
- symetrycznie względem ścian piramid i romboedru.

W niektórych kryształach jednoosiowych występuje sporadycznie wygaszanie spokojne lub niespokojne (np. u kwarcu).

Kryształy dwuosiowe mają przeważnie wygaszanie skośne, rzadziej proste czy symetryczne lub spokojne i niespokojne. Kryształy z układu:

- rombowego wygaszają prosto na ścianach pasa osi  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  oraz symetrycznie na ścianach piramid,
- jednoskośnego wygaszają prosto tylko na ścianach pasa osi  $Y$ ,
- trójskośnego wygaszają skośnie na wszystkich ścianach, a tylko „przypadkowo” prosto, gdy indyktrysa kryształu trójskośnego, zajmująca

położenie względem kierunków krystalograficznych, zależne od składu chemicznego kryształu, ułoży się równolegle do kierunków krystalograficznych.

Jeśli płaszczyzna preparatu mikroskopowego jest prostopadła do płaszczyzny zbliźniaczenia (szwu bliźniaczego), to przeważnie zachodzi symetryczne znikanie światła, ponieważ kierunki drgań światła w obu zrosniętych osobnikach mineralnych są nachylone symetrycznie względem płaszczyzny bliźniaczej. Nie zawsze wygaszanie światła względem szwu bliźniaczego jest symetryczne, na przykład bliźniak karlsbadzki plagioklazu wygasza względem tego kierunku asymetrycznie, ponieważ należy do bliźniaków II rodzaju hemitropii. Przekroje takiego zbliźniaczenia wygaszają asymetrycznie z wyjątkiem przekroju prostopadłego do osi bliźniaczej, w którym oba indywidua zachowują się jak monokryształ, wygaszając światło względem szwu skośnie albo prosto. Jeśli płaszczyzna preparatu mikroskopowego nie jest prostopadła do płaszczyzny zbliźniaczenia, to następuje asymetryczne znikanie światła w zrosniętych osobnikach mineralnych.

Pomiar kąta wygaszania światła w przekrojach zorientowanych względem kierunków krystalograficznych jest cechą diagnostyczną niektórych minerałów, na przykład plagioklazów, piroksenów i amfiboli.

### 18.5.3. Pleochroizm (polichroizm, wielobarwność)

Kryształy, podobnie jak wiele innych ciał fizycznych, absorbują fale elektromagnetyczne. Gdy pochłanianie zachodzi równomiernie w całym zakresie widma widzialnego fal elektromagnetycznych, lub gdy zaabsorbowany zostanie tylko niewielki wycinek widma widzialnego, wtedy kryształ pozostaje bezbarwny. Absorpcji znacznej części widma widzialnego fal elektromagnetycznych towarzyszy wrażenie barwy.

Absorpcja światła w kryształach izotropowych jest jednakowa we wszystkich kierunkach. Kryształy anizotropowe absorbują światło zależnie od kierunku jego rozchodzenia się w kryształach. Towarzyszy temu często zmiana barwy. Zjawisko zmiany barwy zależnie od kierunku rozchodzenia się światła w kryształach określa się mianem pleochroizmu (polichroizmu), czyli wielobarwności.

Intensywność pleochroizmu zależy od współczynnika absorpcji i grubości kryształu. W preparatach mikroskopowych pleochroizm bywa często słabo widoczny, gdy w grubszej płytce tego samego minerału jest już wyraźny lub nawet silny (np. andaluzyt, kordieryt). Są też minerały, które ujawniają pleochroizm tylko w grubszych płytkach (np. apatyt, topaz, cyrkon, korund). Dlatego zjawisko pleochroizmu bada się makroskopowo (głównie w gemologii) i mikroskopowo (głównie w petrografii i mineralogii). W badaniu

mikroskopowym wykorzystuje się mikroskop petrograficzny, a w badaniu makroskopowym dychroskop, czyli tzw. lupę Haidingera i mikroskop gemmologiczny.

Zależnie od mikroskopowej wyrazistości pleochroizmu wyróżnia się kryształy:

- silnie pleochroiczne (np. biotyt, szeryl, lamprobolit, glaukofan),
- wyraźnie pleochroiczne (np. hornblenda, stilpnomelan, piemontyt),
- umiarkowanie pleochroiczne (np. staurolit, riebeckit, pennin),
- słabo pleochroiczne (np. epidot, augit tytanowy, augit bazaltowy, fengit),
- niepleochroiczne (np. kryształy izotropowe, kwarc, cyrkon, apatyt, sylimanit, muskowit, skalenie).

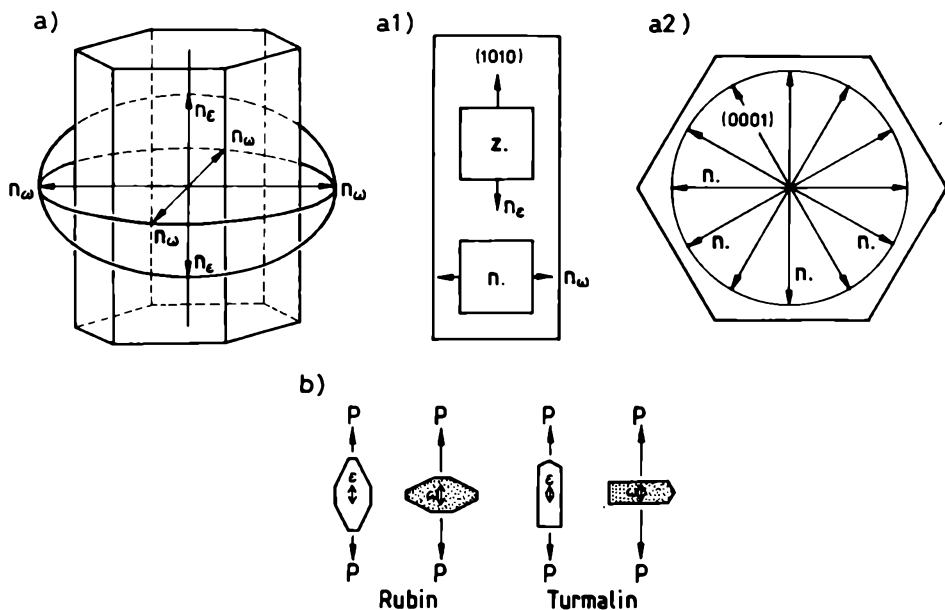
Pleochroizm jest ważną cechą identyfikacyjną kryształów anizotropowych, zwłaszcza silnie pleochroicznych. Żeby ocenić mikroskopowo pleochroizm, należy:

- włączyć analizator,
- obrotem stolika mikroskopu uzyskać wygaszenie przekroju kryształu,
- wyłączyć analizator,
- stwierdzić barwę przekroju,
- dokonać rotacji o  $90^\circ$  badanym przekrojem kryształu, stwierdzając jednocześnie zmianę barwy przekroju (minerał pleochroiczny) lub brak takiej zmiany (minerał niepleochroiczny).

W kryształach pleochroicznych każdemu z azymutów drgań wzajemnie prostopadłych odpowiada pochłanianie fali elektromagnetycznej innej długości. Dlatego też dla różnych azymutów drgań powstają różne barwy pleochroiczne.

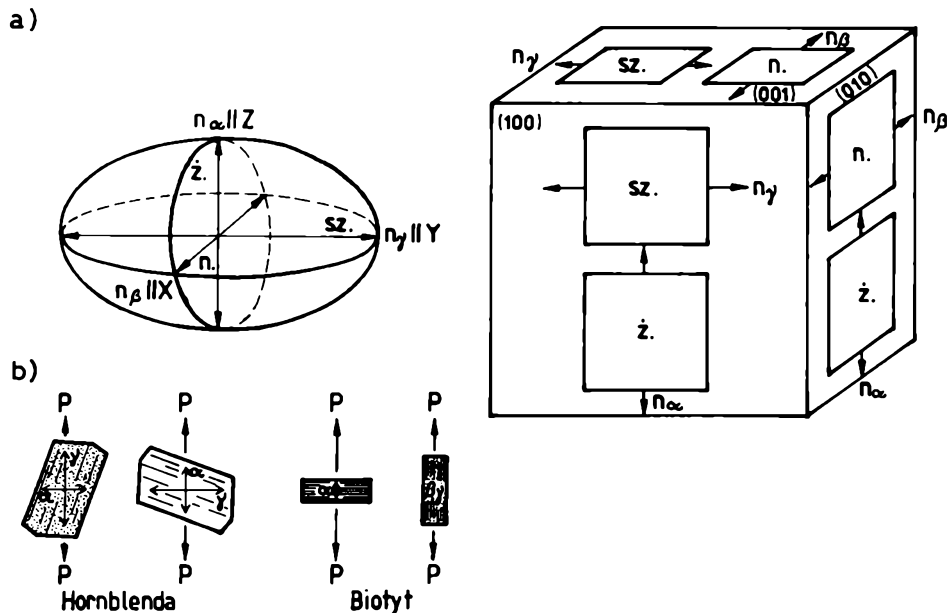
W kryształach jednoosiowych mogą wystąpić tylko dwie główne barwy pleochroiczne odpowiadające kierunkom o największej różnicy prędkości światła w kryształach (fali zwyczajnej i nadzwyczajnej). Stąd trzeba obserwować pleochroizm kryształów jednoosiowych w przekrojach o największej dwójłomności, czyli w przekrojach zgodnych z osią krystalograficzną Z, równoległą do osi optycznej (rys. 62). W przekrojach prostopadłych względem osi optycznej kryształy te nie wykazują pleochroizmu. Pleochroizm kryształów jednoosiowych jest też często określany mianem dichroizmu, zwłaszcza w praktyce gemmologicznej.

W kryształach dwuosiowych wyróżnia się trzy główne barwy pleochroiczne odpowiadające kierunkom skrajnych wartości współczynników załamania światła indyktrisy (rys. 63). Stąd w przekrojach prostopadłych do normalnej optycznej można obserwować barwy pleochroiczne związane z kierunkami drgań wektorów optycznych  $n_x$  i  $n_y$  (np. barwy żółta i szaroniebieska w kordierycie), a w przekrojach prostopadłych do  $n_z$  odpowiednio barwy pleochroiczne związane z wektorami optycznymi  $n_x$  i  $n_y$  (np. żółta i niebieska w kordierycie), gdy w przekrojach prostopadłych do  $n_x$  barwy pleochroiczne



Rys. 62. Pleochroizm kryształów jednoosiowych:

a) beryl (n — niebieska, z — zielona), a1) — beryl, ściana słupa pod lupę Haidingera, a2) — beryl, ściana dwuścianu podstawowego, b) korund (rubin: czerwona, różowa) i turmalin (błado niebieska, niebieska)



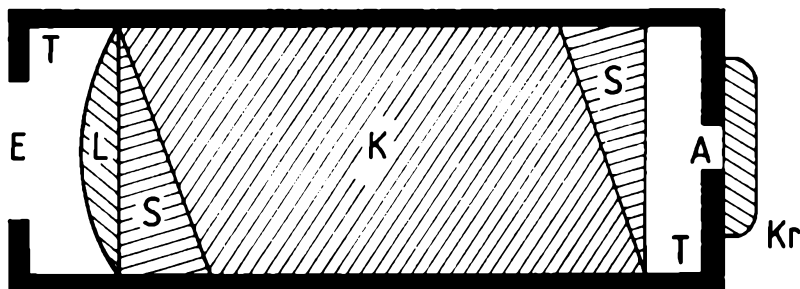
Rys. 63. Pleochroizm kryształów dwuosiowych:

a) kordieryt (z — żółta, n — niebieska, sz — szaroniebieska), b) hornblenda (ciemnozielona, bładozielona) i biotyt (bładozielonkawa, intensywnie zielona lub bładożółta, intensywnie brunatnordzawa)

wektorów optycznych  $n_x$  i  $n_y$  (np. szaroniebieska i niebieska w kordierycie). Dlatego też pleochroizm kryształów dwuosiowych często jest określany mianem trichroizmu, szczególnie w badaniach gemmologicznych. W przekrojach prostopadłych do jednej z dwu osi optycznych kryształów dwuosiowych zjawiska pleochroizmu nie stwierdza się (nie ma zróżnicowania intensywności barwy wraz z obrotem przekroju).

Zarówno w kryształach jednoosiowych, jak i dwuosiowych przekroje przypadkowe dostarczają barw pleochroicznych pośrednich względem głównych barw pleochroicznych minerału, a ich wysycenie zależy od orientacji płaszczyzny przekroju kryształu w stosunku do kierunków reprezentujących główne barwy pleochroiczne kryształu. Każdy z wzajemnie prostopadłych azymutów drgań fal przenikających przez przekrój kryształu, naprowadzany kolejno obrotem stolika mikroskopu na azymut drgań polaryzatora, dostarcza właściwej mu barwy pleochroicznej, wynikającej z orientacji tego przekroju względem kierunków głównych barw pleochroicznych minerału. Rotując zatem przekrój minerału pleochroicznego o  $360^\circ$ , natrafia się czterokrotnie, co  $90^\circ$ , na zmianę barwy pleochroicznej, przy czym co  $180^\circ$  następuje powtórzenie tej samej barwy pleochroicznej, a największa różnica barw występuje podczas rotacji o  $90^\circ$ .

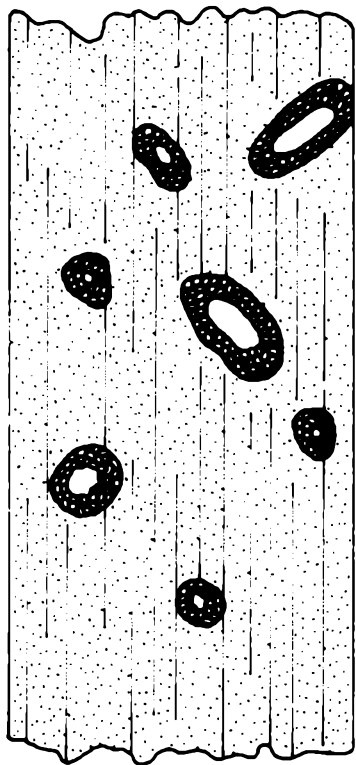
Dychroskop, wynaleziony przez W. Haidingera (1795—1871), geologa i mineraloga, służy do makroskopowego badania pleochroizmu większych kryształów. Głównym elementem dychroskopu jest wydłużony romboedr przezroczystego kalcytu umieszczony w metalowej oprawie zaopatrzonej w kwadratowy otwór na jednym końcu i słabą soczewkę na drugim końcu. Spoglądając przez dychroskop na pleochroiczny kryształ, widać dwa blisko siebie położone kwadratowe otworki, rozświetlone różnobarwnym światłem, których obraz powstaje wskutek podwójnego załamania światła w romboedrze kalcytu (rys. 64). Obrotem oglądanego kryształu można wyszukać takie położenie, w którym różnica barw widzianych w kwadratowych otworkach będzie największa. Są to główne barwy pleochroiczne badanego kryształu.



Rys. 64. Dychroskop:

K — romboedr kalcytu, T — metalowa oprawka, S — szklane pryzmaty, L — soczewka, Kr — badany kryształ,  
A — otwór kwadratowy, E — wizjer

Światłem stosowanym do badania dychroskopem jest światło dzienne rozproszone (tzw. światło nieba północnego). W nowszych dychroskopach zamiast romboedru kalcytu stosuje się tzw. filtr dychroskopowy. Są to sklezione połówki polaroidu w taki sposób, że ich płaszczyzny polaryzacji światła są wzajemnie prostopadłe. Przepuszczone przez filtr dychroskopowy światło wychodzące z kryształu pleochroicznego zmienia barwę każdej z połówek filtra.



Rys. 65. Pola pleochroiczne wokół wrostków promieniotwórczych w biotycie

Silnie pleochroiczne kryształy można obserwować już przy użyciu zwykłego polaroidu. Obracając polaroid, obserwuje się na przemian to jeden, to drugi promień spolaryzowany wychodzący z oświetlanego kryształu. Każdy z promieni będzie miał inną barwę pleochroiczną. Niektóre kryształy mają pleochroizm widoczny bez urządzeń polaryzacyjnych (np. Aleksandryt, rubin, kunzyt).

Specyficznym zjawiskiem pleochroicznym są widoczne mikroskopowo w niektórych minerałach tzw. pola pleochroiczne wokół wrostków radioaktywnych. Powstają one w wyniku destrukcyjnego działania promieniowania  $\alpha$ , rzadziej  $\beta$ , wywołującego się wskutek samorzutnego rozpadu izotopów promieniotwórczych zawartych we wrostkach. W rezultacie tworzą się wąskie, barwne aureole naśladujące kontur wrostków zawierających pierwiastki promieniotwórcze (rys. 65). Pola pleochroiczne zmieniają barwę lub jej natężenie w czasie rotacji przekroju kryształu stolikiem mikroskopu. Spotykane są pospolicie w biotycie, niekiedy także w innych minerałach krzemianowych.

#### 18.5.4. Barwy interferencyjne

Przejściu światła przez przekrój minerału anizotropowego towarzyszy w ogólnym przypadku podwójne załamanie światła i jednoczesna polaryzacja każdego z powstałych promieni w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych. Każdy z promieni ma inną wartość współczynnika załamania światła, a tym samym inną prędkość rozchodzenia się w kryształach. Różnica współczynników

załamania światła powoduje, że promienie odchylają się od pierwotnego kierunku pod różnymi kątami, wskutek czego wytwarza się w czasie przebiegu przez płaskorównoległy przekrój kryształu pewna różnica dróg. Promienie wychodzące z anizotropowego przekroju kryształu różnią się więc nie tylko kierunkiem płaszczyzny drgań, lecz także fazą.

Różnicą dróg nazywa się odległość między dwoma punktami wykazującymi zgodność w fazie drgań, z których każdy odnosi się do jednej z dwóch fal powstałych w wyniku podwójnego załamania światła w kryształach. Różnicę dróg wyraża się wzorem:

$$T = d(n'_e - n_o) \text{ — w kryształach jednoosiowych,}$$

$$T = d(n'_\gamma - n'_\alpha) \text{ — w kryształach dwuosiowych.}$$

gdzie:

$T$  — różnica dróg,

$d$  — grubość preparatu mikroskopowego,

$(n'_e - n_o)$  — dwójłomność przekroju kryształu jednoosiowego,

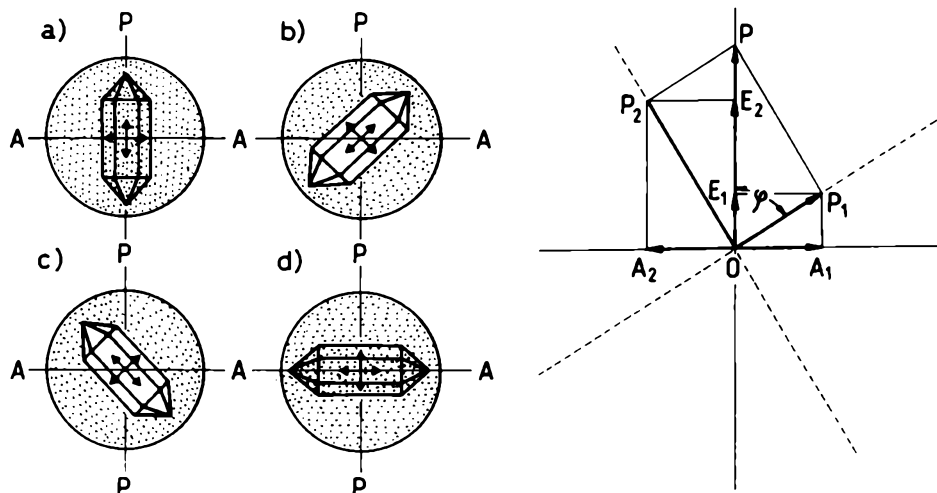
$(n'_\gamma - n'_\alpha)$  — dwójłomność przekroju kryształu dwuosiowego,

Ponieważ płaszczyzny drgań obu powstałych promieni są wzajemnie prostopadłe, nie mogą one interferować i biegą w przestrzeni niezależnie od siebie. Oko ludzkie nie odróżnia światła spolaryzowanego, wychodzącego z kryształu anizotropowego, od światła zwykłego, niespolaryzowanego. Dopiero wprowadzenie w bieg promieni wychodzących z kryształu anizotropowego analizatora umożliwia sprowadzenie drgań obu fal powstałych w wyniku podwójnego załamania do jednej płaszczyzny, gdyż w analizatorze obie fale ulegają ponownie podwójnemu załamaniu. Składowe zwyczajne (dla analizatora) ulegają odbiciu od warstewki balsamu kanadyjskiego sklejającego pryzmat Nicola i zostają pochłonięte przez wycernione ścianki pryzmatu. Natomiast składowe nadzwyczajne (dla analizatora) zostają sprowadzone do wspólnej płaszczyzny, która jest płaszczyzną drgań analizatora i interferują (rys. 66).

Jeśli polaryzator i analizator są skrzyżowane, to ze względu na utratę połowy długości fali wynikającą ze skrzyżowanego położenia nikoli (składowe interferujących promieni są przeciwnie zwrócone) różnicy dróg wynoszącej całkowitą wielokrotność długości fali użytego światła odpowiada wygaszenie tej fali, a różnicy dróg wynoszącej nieparzystą wielokrotność połowy długości fali użytego światła odpowiada jej wzmocnienie. Jeśli polaryzator i analizator mają płaszczyzny drgań ustawione równoległe, to warunek interferencji jest odwrotny.

Wskutek interferencji tworzą się barwy interferencyjne. Nie należy ich mylić z barwą pleochroiczną minerałów anizotropowych lub barwą minerałów izotropowych, które są rezultatem absorpcji światła przez kryształy.





Rys. 66. Interferencja światła w płaszczyźnie drgań analizatora po przejściu przez polaryzator i kryształ

a), d) pozycja wygaszenia światła (wektor  $OP$  zostaje wygaszony przez analizator), b), c) pozycja rozjaśnienia kryształu (wektor  $OP$  zostaje w przekroju kryształu podwójnie załamany i jednocześnie spolaryzowany; powstałe promienie  $OP_1$  i  $OP_2$  ulegają w analizatorze ponownie podwójnemu załamaniu i tworzą się promienie  $OA_1$ ,  $OA_2$  i  $OE_1$ ,  $OE_2$ ; promienie  $OE_1$  i  $OE_2$  ulegają wygaszeniu, natomiast  $OA_1$  i  $OA_2$  sprowadzone do wspólnej płaszczyzny — interferują)

Chcąc zaobserwować barwy interferencyjne w preparacie mikroskopowym, należy:

- włączyć analizator,
- obrotem stolika mikroskopu wokół osi optycznej mikroskopu doprowadzić przekrój kryształu do pełnego rozjaśnienia; w czasie rotacji o  $360^\circ$  barwy interferencyjne pojawiają się czterokrotnie podczas kolejnych rozjaśnień następujących po kolejnych wygaszeniach światła.

Wysokość barwy interferencyjnej zależy od wytwarzanej przez przekrój kryształu różnicy dróg ( $T$ ). Przekroje kryształów z preparatów mikroskopowych różnią się wysokością barw interferencyjnych. Jeśli standardowe preparaty mikroskopowe mają jednakową grubość (od 0,02 mm do 0,03 mm), to różnice wysokości barw interferencyjnych są spowodowane tylko różnicami dwójłomności. Dwójłomność przypadkowego przekroju kryształu (dwójłomność cząstkowa), a tym samym wysokość jego barwy interferencyjnej zależy od:

- dwójłomności minerału,
- położenia płaszczyzny przekroju kryształu w stosunku do bryły optycznej kryształu (np. indykatrysy).

Wartość dwójłomności minerałów ( $\Delta$ ) podają podręczniki mineralogiczne (np. A. Bolewski, 1982; A. Bolewski; A. Manecki, 1993; M. Borkowska; K. Smulikowski, 1973; P. Ramdohr, 1978). W kryształach jednoosiowych

taką dwójłomność wykazują tylko przekroje główne (równoległe do osi optycznej kryształu), a w kryształach dwuosiowych przekroje prostopadłe do normalnej optycznej. W preparatach mikroskopowych najczęstsze są przekroje przypadkowe minerałów, których dwójłomność cząstkowa ( $\Delta'$ ) jest mniejsza od ich dwójłomności.

Biorąc za kryterium dwójłomność, minerały skałotwórcze można podzielić na:

- nadzwyczaj silnie dwójłomne (np. kalcyt, dolomit, magnezyt, syderyt, tytanit);  $\Delta > 0,1$ ,
- bardzo silnie dwójłomne (np. cyrkon, talk, kasyteryt, piemontyt);  $0,05 < \Delta < 0,1$ ,
- silnie dwójłomne (np. anhydryt, biotyt, muskowit, oliwiny, epidoty);  $0,03 < \Delta < 0,05$ ,
- umiarkowanie dwójłomne (np. turmaliny, syllibmanit, diopsyd, prehnit);  $0,02 < \Delta < 0,03$ ,
- słabo dwójłomne (np. wollastonit, baryt, bronzyt, dysten, staurolit);  $0,01 < \Delta < 0,02$ ,
- dość słabo dwójłomne (np. skalenie, zeolity, chalcedon, kwarc, topaz, kaolinit, celestyn, korund);  $0,005 < \Delta < 0,01$ ,
- bardzo słabo dwójłomne (np. nefelin, pennin, apatyt, wezuwian)  $0,001 < \Delta < 0,005$ .

Słabo dwójłomne i silnie dwójłomne grupy minerałów skałotwórczych są mało „czułe” na wpływ wywierany przez zmianę położenia płaszczyzny przekroju minerału względem jego indyktrasy i wynikający stąd wpływ na wysokość barwy interferencyjnej przekroju. Dużo bardziej „czułe” są minerały umiarkowanie dwójłomne, w których niewielka zmiana położenia płaszczyzny przekroju kryształu względem bryły optycznej kryształu (indyktrasy) powoduje istotną zmianę wysokości barwy interferencyjnej. Dlatego też barwy interferencyjne nie mogą być wykorzystywane do bezpośredniej identyfikacji minerałów. Jednak umiejętność oceny ich wysokości, powiązana z ustaleniem położenia płaszczyzny przekroju kryształu względem jego bryły optycznej, daje możliwość określenia dwójłomności badanego minerału.

Uzyskana z użyciem światła białego barwa interferencyjna jest barwą złożoną, powstałą przez wygaszenie pewnych długości fal elektromagnetycznych z widma światła białego i wzmocnienie innych długości fal. Analiza widmowa barwy interferencyjnej wykazuje obecność w jej składzie wszystkich długości fal elektromagnetycznych widma światła białego z wyjątkiem długości wygaszonych przez interferencję. Barwy interferencyjne są zatem barwami dopełniającymi do wygaszonych przez interferencję. Barwy interferencyjne przekrojów kryształów umieszczonych między równoległymi nikolami są barwami dopełniającymi w stosunku do barw interferencyjnych powstają-

cych przy skrzyżowanych nikolach, ponieważ barwy wygaszone skrzyżowanymi nikolami są wzmacniane przez nikole równoległe.

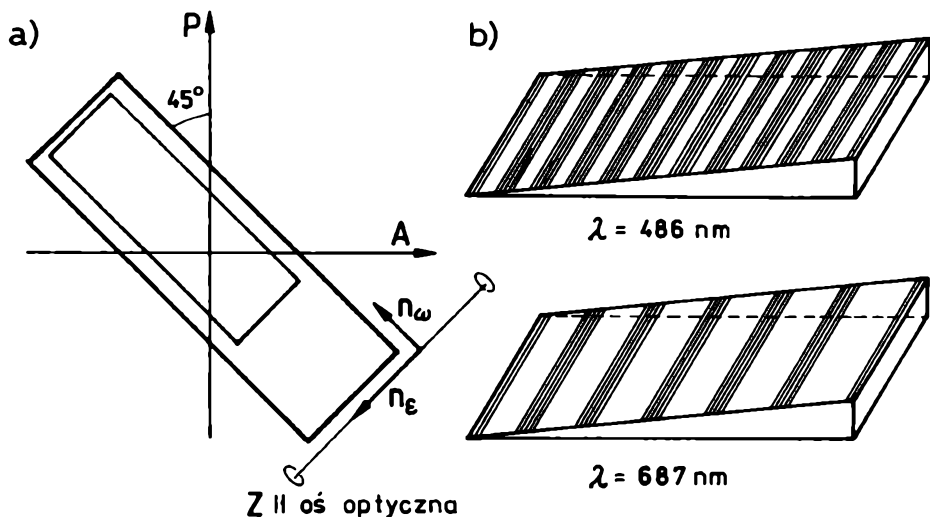
Przekroje kryształów izotropowych nie wykazują barw interferencyjnych z powodu braku w nich podwójnego załamania światła. Identyczne właściwości mają przekroje prostopadłe do osi optycznej kryształów jednoosiowych.

Kompletny zestaw barw interferencyjnych, odpowiadający rosnącej różnicy dróg, można uzyskać:

- dobierając przekroje kryształów tej samej grubości, różniące się dwójłomnością,
- stosując zorientowany optycznie monokryształ o zmieniającej się stopniowo grubości.

Drugi sposób jest technicznie łatwiejszy i bardziej praktyczny. W tym celu wykorzystuje się monokryształ kwarcu przycięty w formę klina o nachyleniu wzajemnym ścian  $0,5^\circ$  (rys. 67). Klin jest wycięty z monokryształu tak, że oś optyczna kwarcu, który jest minerałem jednoosiowym optycznie dodatnim, jest ułożona poprzecznie do wydłużenia, a kierunek optyczny  $n_\omega$  ( $n_\omega < n_e$ ) zgodnie z wydłużeniem klina. Drgania promieni świetlnych przenikających przez klin kwarcowy są więc równoległe do jego dłuższej i krótszej krawędzi, gdy fale świetlne biegną prostopadłe do osi optycznej. Dwójłomność dla tego kierunku przechodzenia światła w kwarcu jest największa i wynosi w świetle żółtym ( $\lambda = 589 \mu\text{m}$ )

$$\Delta = n_e - n_\omega = 1,5533 - 1,5442 = 0,0091.$$



Rys. 67. Klin kwarcowy:

a) klin kwarcowy między skrzyżowanymi polaroidami, umieszczony w szczelinie dla płytek pomocniczych, b) interferencja światła monochromatycznego o różnej długości fali ( $\lambda$ ) za pomocą klina kwarcowego

Klin kwarcowy zalicza się do płytek pomocniczych i stanowi standardowe wyposażenie mikroskopów polaryzacyjnych. W bieg promieni światła w mikroskopie jest wprowadzany przez szczelinę dla płytek pomocniczych. Wsuwając cieńszym końcem klin kwarcowy między skrzyżowane nikole, uzyskujemy stopniowe zwiększenie grubości przekroju, a tym samym różnicy dróg przy stałej jego dwójłomności.

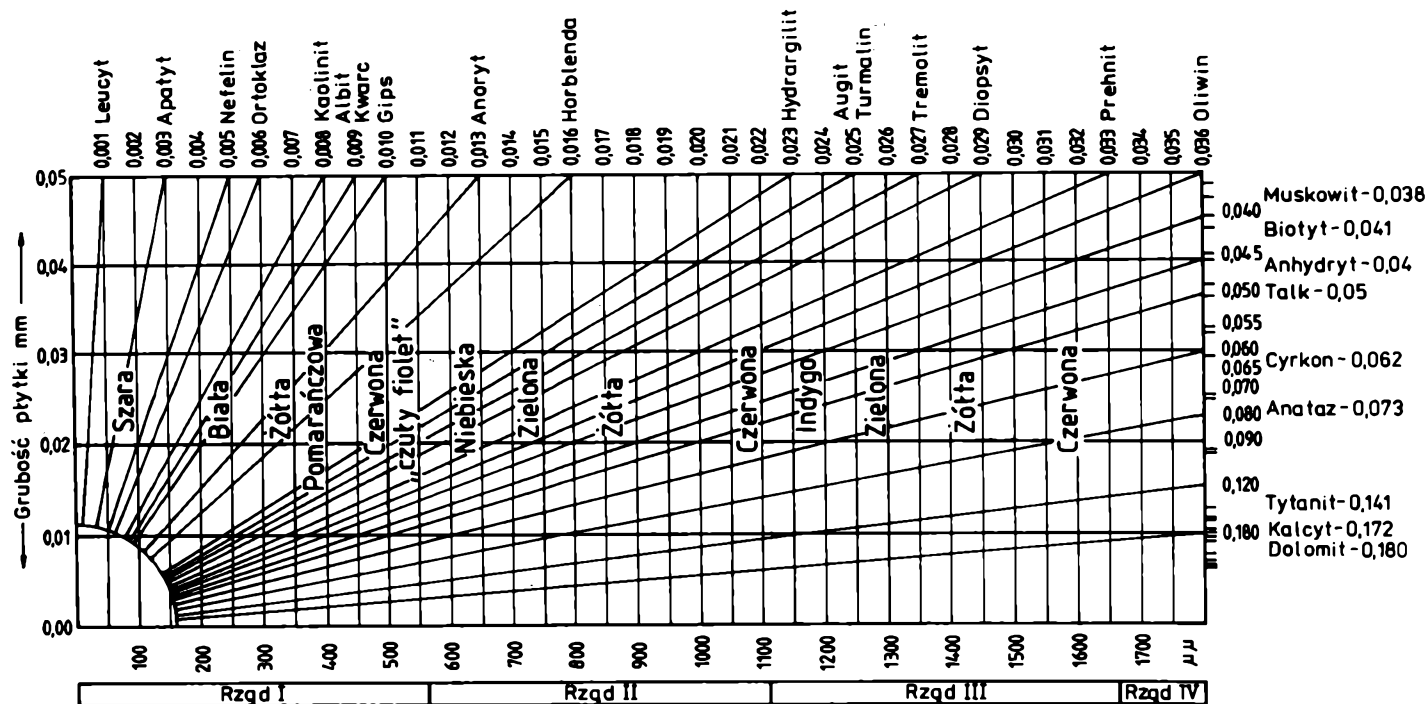
Klin kwarcowy jest wprowadzany w bieg strumienia światła w mikroskopie w położeniu przekątnym w stosunku do płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora. Znaczy to, że kierunki drgań fal świetlnych przenikających przez klin tworzą kąt  $45^\circ$  z kierunkami płaszczyzny drgań polaryzatora i analizatora. W takim położeniu natężenie barwy interferencyjnej jest największe w myśl wzoru Fresnela (por. s. 94):

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \left[ \frac{180 \cdot d(n'_e - n_\omega)}{\lambda} \right],$$

gdzie:

- $d$  — grubość przekroju kryształu,
- $\lambda$  — długość fali użytego światła,
- $n'_e - n_\omega$  — dwójłomność przekroju kryształu,
- $\alpha$  — kąt zawarty między azymutem drgań polaryzatora i azymutem drgań fali świetlnej przenikającej przez przekrój kryształu,
- $I_0$  — natężenie wiązki światła wychodzącej z polaryzatora,
- $I$  — natężenie barwy interferencyjnej.

W świetle białym, którego najczęściej używa się do badań mikroskopowych, w miarę zagłębiania klina kwarcowego w szczelinie dla płytek pomocniczych, obserwujemy charakterystyczną sukcesję barw interferencyjnych, zwaną porządkiem barw interferencyjnych klina kwarcowego w świetle białym przy skrzyżowanych nikolach. Barwy interferencyjne tworzą swoiste cykle nazywane rzędami barw interferencyjnych (rys. 68). Pierwszy rząd tworzą barwy powstające na skutek różnicy dróg nie przekraczającej  $551 \mu\text{m}$ : stalowoszara, sina, biała pierwszego rzędu, żółta pierwszego rzędu, pomarańczowa pierwszego rzędu i czerwona pierwszego rzędu. Pierwszy i drugi rząd barw interferencyjnych rozgranicza tzw. czuły fiolet ( $T = 575 \mu\text{m}$ ) nazywany tak dlatego, że nieznaczne zmniejszenie różnicy dróg (około  $24 \mu\text{m}$ ) powoduje powstanie barwy czerwonej pierwszego rzędu, a niewielkie zwiększenie różnicy dróg (około  $14 \mu\text{m}$ ) wywołuje już barwę indygową drugiego rzędu. Drugi rząd barw interferencyjnych zamyka różnica dróg  $1100 \mu\text{m}$ . Do drugiego rzędu barw interferencyjnych należą (poczynając od najniższej): niebieska, zielona, żółta i czerwona. W trzecim rzędzie barw interferencyjnych grupują się barwy powstające przy różnicy dróg  $1101\text{—}1622 \mu\text{m}$ .



Rys. 68. Porządek barw interferencyjnych klinu kwarcowego (wykres Michel Levy'ego) między skrzyżowanymi polaroidami w świetle białym

Zestaw barw interferencyjnych trzeciego rzędu nie różni się od zestawu barw drugiego rzędu, choć barwy te są już wyraźnie mniej nasycone, bardziej wypłowiałe i bledsze. W kolejnych rzędach zjawisko to potęguje się, a barwy interferencyjne coraz mniej różnią się między sobą, przekształcając się w tzw. białą wysokich rzędów, charakterystyczną dla minerałów nadzwyczaj silnie dwójłomnych. Powodem tworzenia się barwy białej wysokich rzędów jest tak duża różnica dróg, że spełnia ona warunek interferencji dla wielu długości fal elektromagnetycznych z widma widzialnego. Ponieważ zachodzi wzmocnienie i wygaszenie różnych długości fal, więc synteza nie wygaszonych części widma widzialnego daje barwę zbliżoną do białej, czyli tzw. białą wysokich rzędów.

Barwy interferencyjne uzyskiwane klinem kwarcowym ze światła białego są zgodne z teoretycznym schematem kolejności barw interferencyjnych. Podobną zgodność wykazuje większość minerałów skałotwórczych. Znaczące odchylenia od porządku przewidzianego teoretycznym schematem barw interferencyjnych mają minerały barwne oraz niektóre minerały bezbarwne o dużej dyspersji dwójłomności lub kąta osi optycznych. Określa się je mianem minerałów o anormalnych barwach interferencyjnych. Mogą to być barwy:

- subnormalne, gdy różnica współczynników załamania światła niebieskiego lub fioletowego jest mniejsza od analogicznej różnicy światła pomarańczowego lub czerwonego, czyli:

$$\Delta_v < \Delta_p,$$

gdzie:

- $\Delta_v$  — dwójłomność przekroju w świetle niebieskim lub fioletowym,
- $\Delta_p$  — dwójłomność przekroju w świetle pomarańczowym lub czerwonym,

- supernormalne (hipernormalne), gdy różnica współczynników załamania światła niebieskiego lub fioletowego jest większa od analogicznej różnicy światła pomarańczowego lub czerwonego, czyli

$$\Delta_v > \Delta_p.$$

Barwy supernormalne są w stosunku do barw interferencyjnych normalnego porządku wyraźnie jaskrawsze, natomiast barwy subnormalne — bardziej spłowiałe, bez odpowiednika w normalnym porządku barw interferencyjnych klina kwarcowego. Z minerałów skałotwórczych supernormalne barwy interferencyjne mają niektóre minerały grupy epidotu, a subnormalne — niektóre chloryty, wezuwian, prehnit, zoizyt.

### 18.5.5. Określanie dwójłomności przekroju kryształu

Wartość różnicy współczynników załamania światła przekroju kryształu jest bardzo ważną cechą identyfikacyjną, którą można określić w sposób:

- dokładny, przez pomiar kompensatorem (np. kompensatorem Bereka), pomiar ten polega na kompensacji różnicy dróg mierzonego przekroju zorientowanym przekrojem innego minerału (np. kalcytu, fluorku magnezu, kwarcu); współcześnie najchętniej wykorzystuje się kompensator Bereka, gdyż pozwala w czasie pomiaru obserwować badany przekrój, który nie musi być duży i zmierzyć różnicę dróg bardzo dokładnie, zwłaszcza gdy kompensator jest wyposażony w płytkę z fluorku magnezu (tetragonalny) zamiast płytki kalcytowej (kalcyt ma wyższą dyspersję dwójłomności niż fluorek magnezu). Wystarczająco dokładnego pomiaru różnicy dróg dostarcza klin kwarcowy Wrighta z wygrawerowaną na oprawce skalą, która pozwala odczytać różnicę dróg z dokładnością  $\pm 5 \mu\text{m}$ ,

- orientacyjny (przybliżony), przez wizualną ocenę z wykorzystaniem płytki pomocniczej (np. klina kwarcowego) i diagramu Levy'ego (rys. 68).

W badaniach mikroskopowych często zachodzi potrzeba przybliżonej oceny dwójłomności kryształu. W tym celu jest wykorzystywana płytka pomocnicza, która służy do kompensacji barwy interferencyjnej badanego przekroju i za pomocą której można ocenić dwójłomność ilościowo, posługując się diagramem Levy'ego (rys. 68).

Aby skompensować różnicę dróg dla danego przekroju mikroskopowego kryształu, należy:

- włączyć analizator,
- przekrój kryształu obrotem stolika mikroskopu wokół osi optycznej mikroskopu doprowadzić do całkowitego wygaszenia,
- dokonać rotacji przekrojem kryształu (w lewo lub w prawo) o  $45^\circ$ ,
- wsunąć w szczelinę dla płytek pomocniczych klin kwarcowy do głębokości zapewniającej kompensację barwy interferencyjnej badanego przekroju; podwyższanie się barwy interferencyjnej przekroju w czasie zagłębiania klina kwarcowego oznacza konieczność dokonania rotacji przekrojem kryształu o  $90^\circ$ ; w tym położeniu nastąpi już pożądane obniżanie się barwy interferencyjnej przekroju prowadzące do kompensacji; po przekroczeniu położenia kompensacji, w miarę dalszego zagłębiania klina kwarcowego, następuje stopniowy wzrost barwy interferencyjnej przekroju (skompensowanie standardowym klinem kwarcowym przekrojów silnie dwójłomnych jest niemożliwe).

Wysokość barwy kompensującej ustala się:

- przez usunięcie preparatu mikroskopowego ze stolika mikroskopu i określenie w wysuwanym klinie kwarcowym wysokości barwy kompensującej,

— bądź przez cofnięcie klina kwarcowego i jednocześnie wyliczenie wysokości barwy kompensującej (konieczne większe doświadczenie w mikroskopowaniu).

Znając wysokość kompensującej barwy interferencyjnej można za pomocą diagramu Levy'ego, opierającego się na związku między różnicą dróg ( $T$ ), grubością preparatu mikroskopowego ( $d = 0,02\text{--}0,03\text{ mm}$ ) i dwójłomnością ( $\Delta$ ):

$$T = d\Delta$$

określić dwójłomność, gdyż barwa, która skompensowała przekrój, odzwierciedla wytworzoną przez ten przekrój różnicę dróg (rys. 68).

Tak określona dwójłomność jest z reguły orientacyjna, bardziej jakościowa niż ilościowa, lecz we wstępnej identyfikacji mikroskopowej często wystarczająca, zwłaszcza dla standardowej identyfikacji minerałów skałotwórczych. Istotną zaletą tego sposobu oceny dwójłomności przekroju minerału jest mała pracochłonność, łatwość jej wykonania oraz możliwość przeprowadzenia za pomocą mikroskopów petrograficznych, nawet bardzo skromnie wyposażonych.

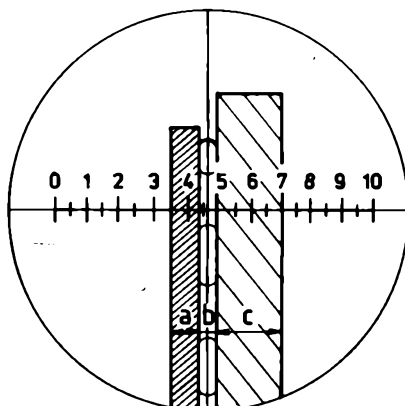
### 18.5.6. Pomiar grubości preparatu mikroskopowego

Diagram Levy'ego jest przydatny także do oceny grubości preparatów mikroskopowych. W takich preparatach jednak muszą znajdować się przekroje kryształów o znanej dwójłomności, której odpowiada określona, łatwa do identyfikacji barwa interferencyjna. Funkcję tę spełnia zwykle kwarc (w przekrojach równoległych do osi optycznej), który jest dość pospolitym minerałem wielu skał skorupy ziemskiej. Jeśli grubość preparatu mikroskopowego jest standardowa ( $0,02\text{--}0,03\text{ mm}$ ), to przekroje kwarcu o najwyższej dwójłomności nie mogą mieć barwy interferencyjnej wyższej od białej pierwszego rzędu, ponieważ ich dwójłomność nie może być większa od  $0,0091$ , a różnica dróg wynosi wówczas około  $260\text{ }\mu\text{m}$ , co odpowiada barwie interferencyjnej białej pierwszego rzędu. Przy niewielkim przekroczeniu standardowej grubości preparatu przekroje kwarcu o najwyższej dwójłomności stają się słomkowe i bladożółtawe. Dalsze przekroczenie grubości preparatu powoduje wytworzenie się barwy żółtej, pomarańczowej lub czerwonej pierwszego rzędu, ewentualnie barw z drugiego i wyższych rzędów barw interferencyjnych. Zależność między grubością preparatu mikroskopowego i wysokością barwy interferencyjnej jest wykorzystywana pospolicie podczas wykonywania preparatów ze skał i minerałów do badań mikroskopowych. Prowadzona podczas szlifowania systematyczna kontrola wysokości barwy interferencyjnej ścienia-minerału czy skały pozwala osiągnąć pożądaną grubość preparatu mikroskopowego. Dysponując zatem przekrojem kryształu o znanej dwój-



łomności, której odpowiada łatwa w identyfikacji barwa interferencyjna (najlepiej z pierwszego lub drugiego rzędu barw interferencyjnych), można łatwo z diagramu Levy'ego odczytać przybliżoną grubość preparatu.

Innym sposobem mierzenia grubości preparatu mikroskopowego jest bezpośredni pomiar wykonany na ustawionej bokiem płytce cienkiej, umocowanej plasteliną, z zastosowaniem okularu mikrometrycznego (rys. 69).



Rys. 69. Bezpośredni pomiar grubości preparatu mikroskopowego okularom mikrometrycznym:

a — grubość szkiełka nakrywkowego, b — grubość skrawka skały, c — grubość szkiełka podstawowego

Jeszcze inny sposób pomiaru grubości płytki krystalicznej z wykorzystaniem mikroskopu zaproponował de Chaulnes. Wykorzystując wzór de Chaulnesa (patrz rozdz. 18.5.1.6):

$$d = nh,$$

gdzie:

- $d$  — grubość płytki krystalicznej,
- $n$  — współczynnik załamania światła płytki krystalicznej,
- $h$  — pozorna grubość płytki krystalicznej,

należy wybrać przekrój o znanej wartości współczynnika załamania światła (np. kryształu kwarcu). Używając obiektywu krótkoogniskowego, nastawiamy na ostre widzenie raz dolną, raz górną powierzchnię obranego przekroju. Z różnicy położenia odczytanej na śrubie mikrometrycznej, wycechowanej podziałką 0,002 mm, określamy wartość pozornej grubości płytki krystalicznej ( $h$ ). Ten sposób pomiaru grubości płytki krystalicznej jest godny polecenia tylko dla elementów o znacznej grubości (np. w gemmologii). W praktyce mineralogiczno-petrograficznej nie stosuje się go ze względu na niezadowalającą precyzję pomiaru.

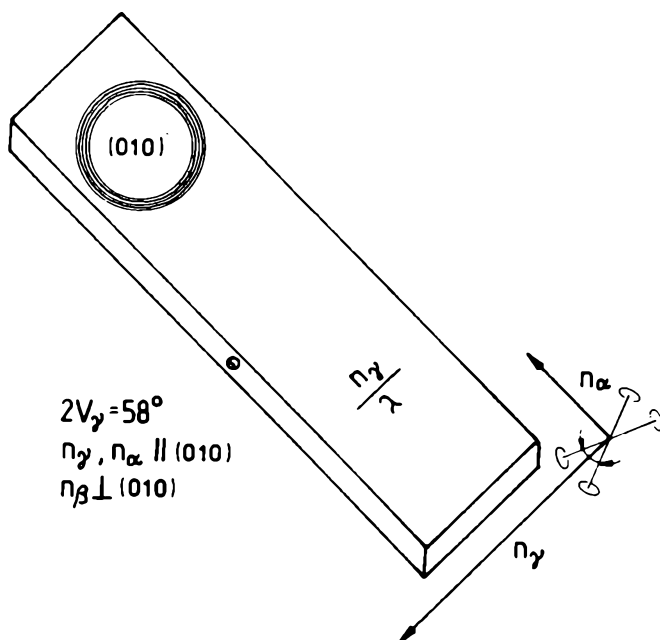
Najdokładniejszą metodą pomiaru grubości płytki krystalicznej ( $d$ ) jest pomiar różnicy dróg ( $T$ ) w kwarcu ( $Q$ ) odznaczającym się nadzwyczaj stałą wartością dwójłomności ( $\Delta_Q = 0,009$ ):

$$d = \frac{T}{\Delta_Q}.$$

### 18.5.7. Płytki pomocnicze i ich zastosowanie

Płytki wycięte z pewnych minerałów anizotropowych, dające określone, często bardzo czułe, barwy interferencyjne, są w standardowym wyposażeniu mikroskopu petrograficznego. Płytki te wykonuje się zwykle z gipsu (gipsówka), jasnej miki (mikówka) i kwarcu (klin kwarcowy). Płytki takie określa się zwykle mianem płytek pomocniczych.

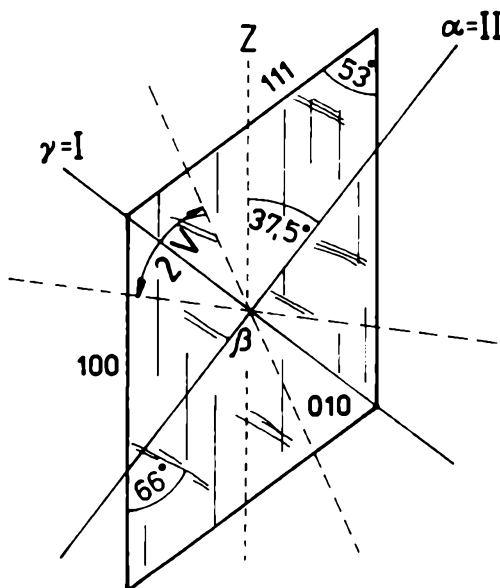
Gipsówkę wycina się z kryształu gipsu równoległe do płaszczyzn łupliwości (010) i umieszcza w metalowej oprawce w taki sposób, że dłuższej krawędzi oprawki odpowiada kierunek wektora optycznego  $n_\alpha$ , a krótszej — kierunek wektora optycznego  $n_\gamma$ . Na oprawce gipsówki zaznacza się położenie wektora optycznego  $n_\gamma$  (rys. 70). Gips jest minerałem optycznie dwuosiowym, dodatnim, niepleochroicznym, z płaszczyzną osi optycznych równoległą do płaszczyzny (010), krystalizującym w układzie jednoskośnym ( $Y = n_\beta$ ). Fale przenikające przez gipsówkę zgodnie z osią optyczną mikro-



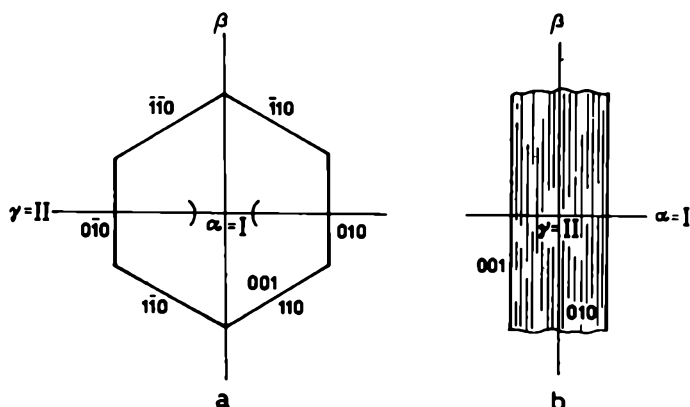
Rys. 70. Gipsówka

skopu, czyli prostopadłe do płaszczyzny (010), mają współczynniki załamania światła  $n_x = 1,5207$  i  $n_y = 1,5305$ , co wywołuje dwójłomność  $0,0098$  (rys. 71). Grubość gipsówki ( $0,056 \text{ mm}$ ) jest tak dobrana, żeby między skrzyżowanymi nikolami dawała barwę interferencyjną czerwoną pierwszego rzędu, odpowiadającą różnicy dróg  $551 \mu\text{m}$ . W użyciu są także gipsówki o nieco większej grubości, dające między skrzyżowanymi nikolami barwę interferencyjną fioletową (tzw. czuły fiolet), odpowiadającą różnicy dróg  $575 \mu\text{m}$ .

Mikówkę wykonuje się z muskowitu przeciętego równolegle do płaszczyzny najlepszej łupliwości (tzw. łupliwości blaszkowej), czyli równolegle do płasz-



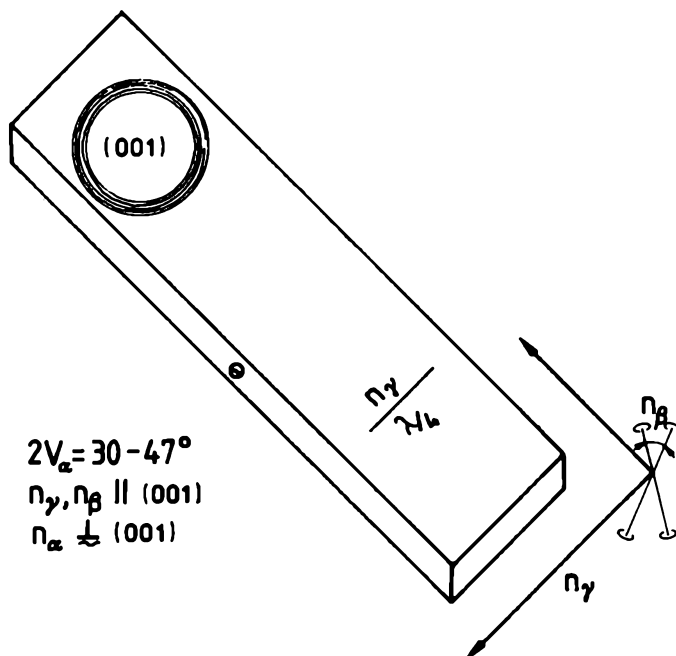
Rys. 71. Orientacja optyczna gipsu



Rys. 72. Orientacja optyczna muskowitu:

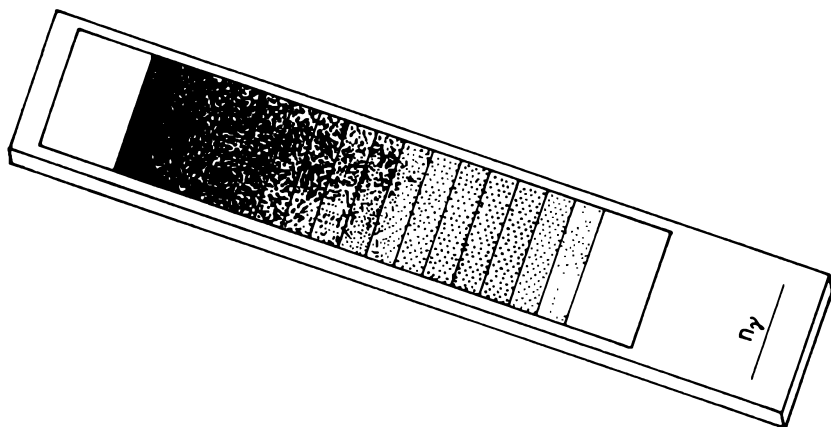
a) na ścianie 001, b) w przekroju 010

czyzny (001). Jednoskośny muskowił jest optycznie ujemny, dwuosiowy, a wektor optyczny  $n_z$  jest w przybliżeniu prostopadły do płaszczyzny łupliwości blaszkowej (rys. 72). Fale świetlne przenikając przez mikówkę, mają współczynniki załamania światła równe  $n_\beta$  i  $n_\gamma$ , co jest zaznaczane na metalowej oprawce (rys. 73). Grubość mikówki dobiera się tak, że wytwarza różnicę dróg  $140\ \mu\text{m}$ , odpowiadającą  $1/4$  długości fali światła żółtego. Z tego powodu mikówka bywa nazywana ćwierćfalówką. Wobec takiej różnicy dróg powstaje szara barwa interferencyjna pierwszego rzędu.



Rys. 73. Mikówka

Klin Fedorowa, rzadko już dziś spotykany w wyposażeniu mikroskopów petrograficznych, spełnia podobną funkcję, jak klin kwarcowy (patrz rozdz. 18.5.4; 18.5.5). Jest to płytka pomocnicza złożona z kilkunastu nałożonych na siebie, cofniętych schodkowo, warstw muskowiłu, z których każda daje różnicę dróg równą ćwierćfalówce. Dolna, najdłuższa warstwa muskowiłu, jest nakryta piętnastoma warstwami, każdą o dwa milimetry krótszą (rys. 74). Wsuwając zatem klin Fedorowa (klin mikowy) w szczelinę dla płytek pomocniczych mikroskopu, przy skrzyżowanych nikolach, otrzymuje się kolejno coraz to wyższe barwy interferencyjne odpowiadające różnicom dróg wynoszącym całkowitą wielokrotność  $1/4$  długości fali światła żółtego.

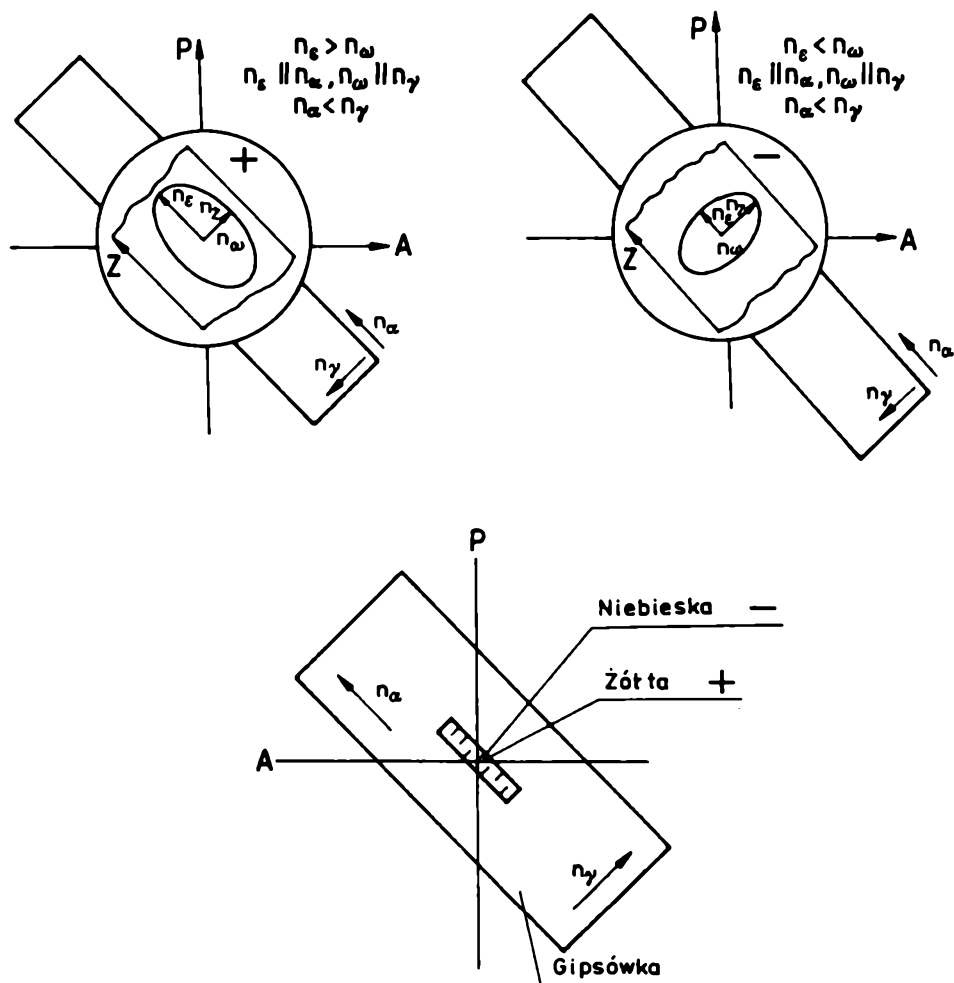


Rys. 74. Klin Fedorowa

Płytki pomocnicze są przydatne do:

- odróżniania przekrojów minerałów anizotropowych o bardzo niskich barwach interferencyjnych (np. ciemnoszarych i szarych) od przekrojów minerałów izotropowych lub anizotropowych jednoosiowych optycznie, przeciętych płaszczyzną preparatu prostopadle do osi optycznej (tj. przekrojów izotropowych kryształów jednoosiowych i dwuosiowych),
- wykrywania w preparacie mikroskopowym drobnych przekrojów minerałów anizotropowych silnie dwójłomnych o bardzo wysokich barwach interferencyjnych (np. białej wysokiej rzędów),
- ustalania pozycji wygaszenia światła przekroju przy dokładnym pomiarze kąta wygaszania światła,
- określania charakteru optycznego kryształów jednoosiowych i dwuosiowych (patrz rozdz. 18.6, rys. 75),
- oznaczania kierunku drgań fali szybszej i wolniejszej w dowolnym przekroju minerału anizotropowego,
- określania charakteru optycznego głównego pasa przekrojów minerałów o pokroju wydłużonym (np. słupkowych, igielkowych, włóknistych).

Przekroje kryształów o bardzo niskich barwach interferencyjnych odróżnia się od przekrojów kryształów regularnych, przekrojów izotropowych i dwuosiowych za pomocą gipsówki lub klina kwarcowego. Wprowadzenie płytki pomocniczej w bieg strumienia światła w mikroskopie powoduje dodanie lub odjęcie od różnicy dróg wytwarzanej przez przekrój kryształu różnicy dróg wytwarzanej przez płytkę pomocniczą. Ponieważ są to przekroje o bardzo niskich barwach interferencyjnych lub izotropowe, pożądaną reakcją optyczną jest więc podwyższenie barwy interferencyjnej po wprowadzeniu



Rys. 75. Określenie znaku optycznego kryształu jednoosiowego w przekroju głównym za pomocą gipsówki (kryształ dodatni — obniżenie barwy interferencyjnej, kryształ ujemny — podwyższenie barwy interferencyjnej)

płytki pomocniczej w bieg strumienia światła. Takiej reakcji optycznej można oczekiwać tylko wówczas, gdy wektor optyczny badanego przekroju, równoległy do wektora  $n_\alpha$  gipsówki lub wektora  $n_o$  klina kwarcowego, jest mniejszym współczynnikiem załamania światła. Żeby skutecznie dokonać odróżnienia, należy:

- włączyć analizator,
- obrócić przekrój kryształu o  $45^\circ$  od pozycji wygaszenia światła,

— wprowadzić płytkę pomocniczą, obserwując jednocześnie reakcję optyczną; jeśli nie nastąpi podwyższenie barwy interferencyjnej przekroju, to należy obrócić przekrój kryształu o  $90^\circ$  i ponownie wprowadzić płytkę pomocniczą; dalszy brak podwyższenia barwy interferencyjnej przekroju oznacza przekrój izotropowy; widoczna jest wówczas tylko barwa interferencyjna płytki pomocniczej.

Różnica dróg wytwarzana przez płytki pomocnicze nie powoduje zauważalnej zmiany barw interferencyjnych kryształów silnie dwójłomnych (np. węglanów, tytanitu), gdyż jest zbyt mała, by spowodować wyraźniejsze zmiany jakościowe. Wykorzystuje się to do wykrywania w preparacie mikroskopowym drobnych przekrojów kryształów silnie dwójłomnych, które mogą umknąć uwagi na tle innych przekrojów mineralnych. Wprowadzenie w bieg strumienia światła gipsówki powoduje wyraźną zmianę jakościową barw interferencyjnych przekrojów o umiarkowanej i niskiej dwójłomności. Barwy interferencyjnej nie zmieniają tylko przekroje minerałów silnie dwójłomnych. Ich barwa interferencyjna (tzw. biała wysokich rzędów) dobrze kontrastuje z niżej dwójłomnymi przekrojami, ułatwiając ich zauważenie.

Płytki pomocnicze stosuje się także do uściślenia pomiaru kąta wygaszenia światła. Jeśli kierunki drgań fal świetlnych przechodzących przez przekrój kryształu nie pokrywają się ściśle z kierunkiem drgań fal emitowanych przez polaryzator (a więc nie jest to pozycja całkowitego wygaszenia), to barwa interferencyjna przekroju kryształu jest nieznacznie podwyższona lub obniżona po wprowadzeniu w bieg światła gipsówki. Barwę interferencyjną płytki pomocniczej widać tylko w pozycji całkowitego wygaszenia przekroju badanego kryształu. Oko człowieka jest bardziej wrażliwe na zmianę, nawet niewielką, odcienia barwy niż jej natężenia. Dlatego zastosowanie płytki pomocniczej zwiększa dokładność odczytu położenia pozycji całkowitego wygaszenia światła przez przekrój, a tym samym precyzję pomiaru kąta wygaszenia światła. Średnia wyciągnięta z kilku lub kilkunastu pomiarów kąta wygaszenia przekroju kryształu zwiększa jeszcze bardziej dokładność pomiaru.

Jeśli można wyszukać w preparacie mikroskopowym przekrój główny minerału jednoosiowego, to z zastosowaniem płytki pomocniczej (najlepiej gipsówki) da się ustalić znak optyczny tego minerału (rys. 75). Przekroje główne wyróżniają się najwyższą dwójłomnością, manifestując się najwyższymi barwami interferencyjnymi. Dodatkowych informacji o orientacji przekroju może dostarczyć automorficzny pokrój kryształu oraz ilość i położenie systemów śladów płaszczyzn łupliwości, zrostów bliźniaczych czy orientacja kierunków maksymalnej i minimalnej absorpcji światła w kryształach (barw pleochroicznych).

Wysokość barwy interferencyjnej przekroju kryształu jest wprost proporcjonalna do jego dwójłomności i grubości. Przekroje cieńsze zatem mają niższe barwy interferencyjne niż przekroje grubsze o takiej samej orientacji

optycznej. Ten sam efekt można osiągnąć, nakładając na siebie jednakowo zorientowane optycznie przekroje minerałów, tj.  $n_x // n_{x1}$  i  $n_y // n_{y1}$  lub  $n_\omega // n_{\omega1}$  i  $n_z // n_{z1}$ . Obniżenie sumarycznej barwy interferencyjnej da się uzyskać przez skrzyżowanie równoległych uprzednio przekrojów minerałów, tj.  $n_x \perp n_{x1}$  i  $n_y \perp n_{y1}$  lub  $n_\omega \perp n_{\omega1}$  i  $n_z \perp n_{z1}$ .

Wprowadzając w bieg strumienia światła płytkę pomocniczą, dokonujemy zwiększenia grubości przekroju krystalicznego, przez który przenika światło spolaryzowane. Obserwowana w okularze reakcja optyczna może być dwójaka:

- podwyższenie sumarycznej barwy interferencyjnej,
- obniżenie sumarycznej barwy interferencyjnej.

Jeśli minerał optycznie jednoosiowy jest dodatni, to wprowadzenie gipsówki, której dłuższa krawędź pokazuje kierunek wektora optycznego  $n_\omega$ , powoduje obniżenie barwy interferencyjnej przekroju głównego (np. kwarcu), a jeśli jest ujemny, to następuje podwyższenie barwy interferencyjnej przekroju głównego (np. apatytu), ponieważ  $n_z < n_\omega$  w kryształach jednoosiowych ujemnych, a  $n_z > n_\omega$  w kryształach jednoosiowych dodatnich. Po wprowadzeniu gipsówki w bieg strumienia światła zachodzi więc równoległość kierunków wolniejszego i szybszego przechodzenia światła przez przekrój główny kryształu ujemnego względem analogicznych kierunków płytki pomocniczej, a w kryształach dodatnich analogiczne kierunki przekroju kryształu i gipsówki są wzajemnie prostopadłe (rys. 75).

Chcąc określić charakter optyczny kryształu jednoosiowego, należy:

- znaleźć w preparacie mikroskopowym przekrój główny minerału jednoosiowego,
- włączyć analizator,
- wygasić przekrój kryształu obrotem stolika mikroskopu wokół osi optycznej mikroskopu,
- zrotować przekrój kryształu o  $45^\circ$  względem pozycji wygaszenia, doprowadzając do zgodności kierunek szczeliny dla płytek pomocniczych i kierunek osi optycznej równoznaczny kierunkowi osi krystalograficznej  $Z$  zawartej w przekroju i znaczonej słupowym wydłużeniem przekrojów, śladami ścian słupowych kryształu lub śladami płaszczyzn łupliwości, czy też kierunkiem minimalnej absorpcji światła,
- wprowadzić gipsówkę, obserwując barwę interferencyjną przekroju; jej obniżenie się oznacza znak optyczny dodatni, a jej podwyższenie — znak optyczny ujemny.

Do określenia położenia kierunków drgań fali szybszej i wolniejszej w przekroju kryształu, czyli do ustalenia położenia wektorów optycznych  $n'_x$  i  $n'_y$  w przekrojach kryształów dwuosiowych i wektorów optycznych  $n'_z$  i  $n_\omega$  w przekrojach kryształów jednoosiowych, należy:

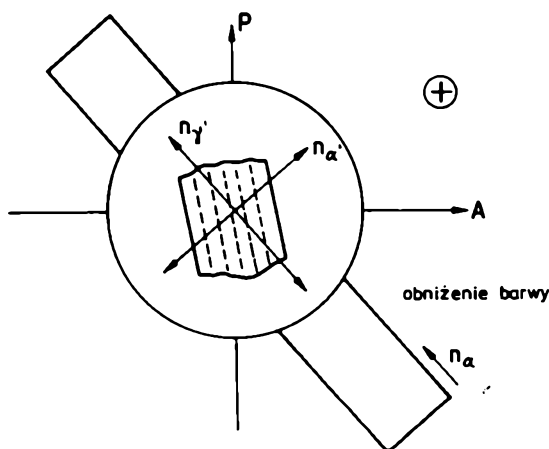
- włączyć analizator,



- zrotować przekrój kryształu o  $45^\circ$  w stosunku do pozycji całkowitego wygaszenia światła,
- wprowadzić w szczelinę dla płytek pomocniczych gipsówkę,
- ustalić, czy wektor optyczny badanego przekroju kryształu równoległy do wektora optycznego  $n_x$  gipsówki (dłuższej krawędzi gipsówki) jest:

a) wektorem odpowiadającym mniejszemu współczynnikowi załamania światła w przekroju kryształu, co objawia się podwyższeniem barwy interferencyjnej,

b) wektorem odpowiadającym większemu współczynnikowi załamania światła w przekroju kryształu, co objawia się obniżeniem barwy interferencyjnej przekroju (rys. 76).



Rys. 76. Oznaczenie położenia kierunku drgań fali szybszej i wolniejszej w przekroju kryształu

Gdy przekrój kryształu jest wyraźnie wydłużony, wówczas można określić charakter optyczny głównego pasa, czyli zbadać zgodność kierunku wydłużenia kryształu z kierunkiem drgań wektora optycznego  $n_x$  lub  $n_y$  gipsówki. Wydłużenie jest ujemne wtedy, kiedy zgadza się z kierunkiem wektora optycznego  $n_x$  lub  $n_y$ , a dodatnie, gdy pokrywa się z wektorem  $n_z$  lub  $n_z$ . Kryształy wydłużone zgodnie z położeniem wektora optycznego  $n_z$  mają charakter głównego pasa dodatnio-ujemny (np. epidoty).

## 18.6. Badania w świetle spolaryzowanym przechodzącym, zbieżnym (badania konoskopowe)

W celu odróżnienia kryształów jednoosiowych od dwuosiowych, dodatnich od ujemnych oraz oceny wielkości kąta między osiami optycznymi, skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, dyspersji, a także ustalenia położenia płaszczyzny przekroju kryształu względem jego głównych kierunków optycznych, używa się światła spolaryzowanego zbieżnego (konoskopu).

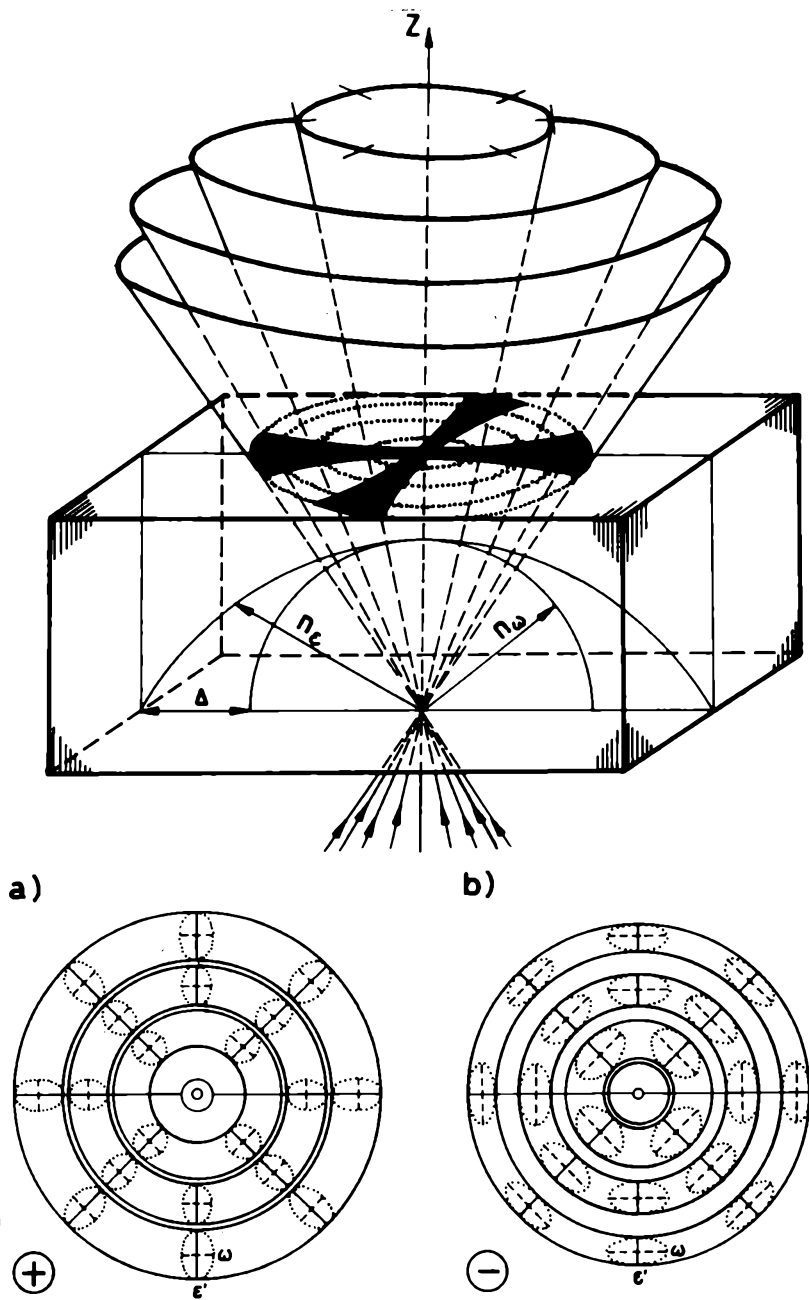
Standardowo wyposażone mikroskopy polaryzacyjne mają możliwość wytworzenia wiązki światła spolaryzowanego zbieżnego. Do tego celu służy bądź odpowiednio przystosowany kondensor, bądź dodatkowa, silnie skupiająca soczewka, zwana pospolicie soczewką Lasaulx, oraz występująca powyżej analizatora soczewka służąca do powiększania obrazu konoskopowego, zwana soczewką Bertranda - Amiciego.

Aby przeprowadzić badanie konoskopowe, należy:

- sprawdzić scentrowanie mikroskopu,
- wytypować przekrój kryształu (im jest większy, tym jest dogodniejszy w badaniu),
- dobrać taki obiektyw, by przekrój kryształu wypełniał całe pole widzenia (zwykle są to obiektywy krótkoogniskowe; jedynie dla skał grubokrystalicznych mogą być przydatne obiektywy średnioogniskowe); obiektyw krótkoogniskowy pozwala obserwować obraz wytworzony przez najbardziej odchyloną od kierunku osi optycznej mikroskopu część wiązki światła zbieżnego, gdyż jego apertura jest największa,
- wyostrzyć obraz badanego przekroju kryształu,
- włączyć kondensor do wytwarzania wiązki światła zbieżnego (np. włączyć soczewkę Lasaulx),
- włączyć analizator,
- zwiększyć natężenie wiązki światła emitowanego przez źródło światła,
- włączyć soczewkę Bertranda - Amiciego,
- wyostrzyć uzyskany obraz konoskopowy dźwignią soczewki Bertranda - Amiciego.

Każdy z promieni światła zbieżnego padając ukośnie na preparat mikroskopowy, ulega podwójnemu załamaniu i polaryzacji, przy czym powstałe składowe uzyskują określoną różnicę dróg ujawnianą przez analizator wskutek interferencji. Ponieważ fale świetlne przechodzą przez preparat mikroskopowy pod różnymi kątami, więc w świetle zbieżnym uzyskuje się obraz interferencyjny składający się z:

- izogir, czyli ciemnych pasów lub krzywych będących miejscem geometrycznym punktów odpowiadających promieniom mającym kierunki drgań zgodne z przekrojami głównymi skrzyżowanych nikoli,



Rys. 77. Schemat tworzenia się obrazu interferencyjnego w kryształach jednoosiowych w świetle zbieżnym (przekrój kryształu prostopadły do osi optycznej):

a) kryształ dodatni optycznie, b) kryształ ujemny optycznie

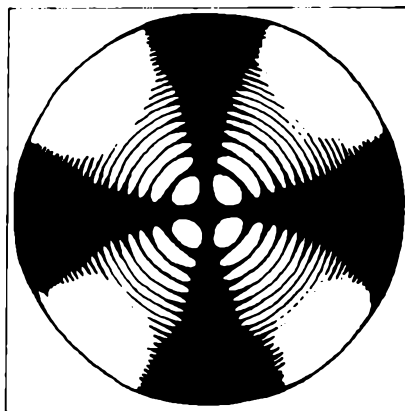
— krzywych izochromatycznych, czyli jednobarwnych pasów, lub krzywych będących miejscem geometrycznym punktów odpowiadających promieniom przenikającym przez badany przekrój i wykazujących jednakową różnicę dróg.

W rezultacie ukazuje się w okularze obraz interferencyjny uzyskany za pomocą wiązki światła zbieżnego (rys. 77), a nie widać samego przekroju kryształu, który go wytworzył.

### 18.6.1. Odróżnianie kryształów jedno- i dwuosiowych

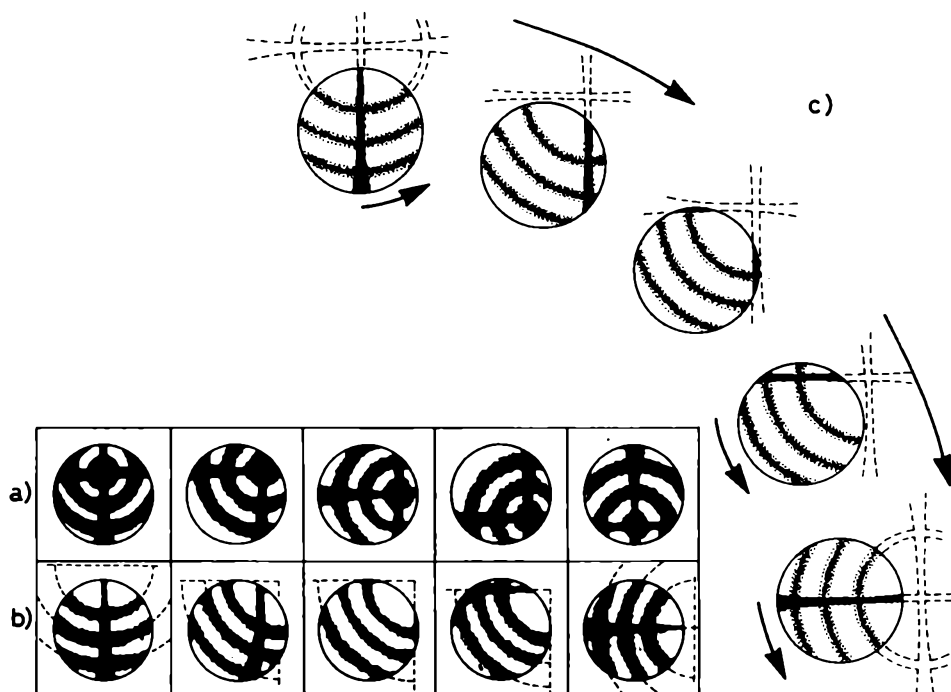
Obrazy interferencyjne kryształów jedno- i dwuosiowych różnią się zasadniczo, umożliwiając tym samym ich identyfikację. Różnice występują także dla różnych przekrojów tego samego kryształu.

Obraz interferencyjny kryształu jednoosiowego przeciętego prostopadłe do osi optycznej ma postać czarnego krzyża (krzyża izogir) o ramionach poszerzających się nieco ku brzegom obrazu, równoległych do płaszczyzn drgań polaryzatora i analizatora (pionowej i poziomej krzyża nici pajęczych). Tło krzyża stanowią współśrodkowe pierścienie krzywych izochromatycznych (rys. 78). Ilość współśrodkowych pierścieni barwnych, rozmieszczonych zgodnie z porządkiem barw interferencyjnych klina kwarcowego, zależy od dwójłomności przekroju kryształu (najniższe barwy interferencyjne w pobliżu przecięcia się ramion krzyża wzrastają ku brzegowi obrazu). Kryształy o niskiej dwójłomności w preparatach o standardowej grubości mają jeden, dwa pierścienie izochromatyczne (np. kwarc, skałęń, baryt), natomiast kryształy o silnej dwój-



Rys. 78. Obraz interferencyjny kryształu optycznie jednoosiowego w świetle zbieżnym (przekrój kryształu prostopadły do osi optycznej)

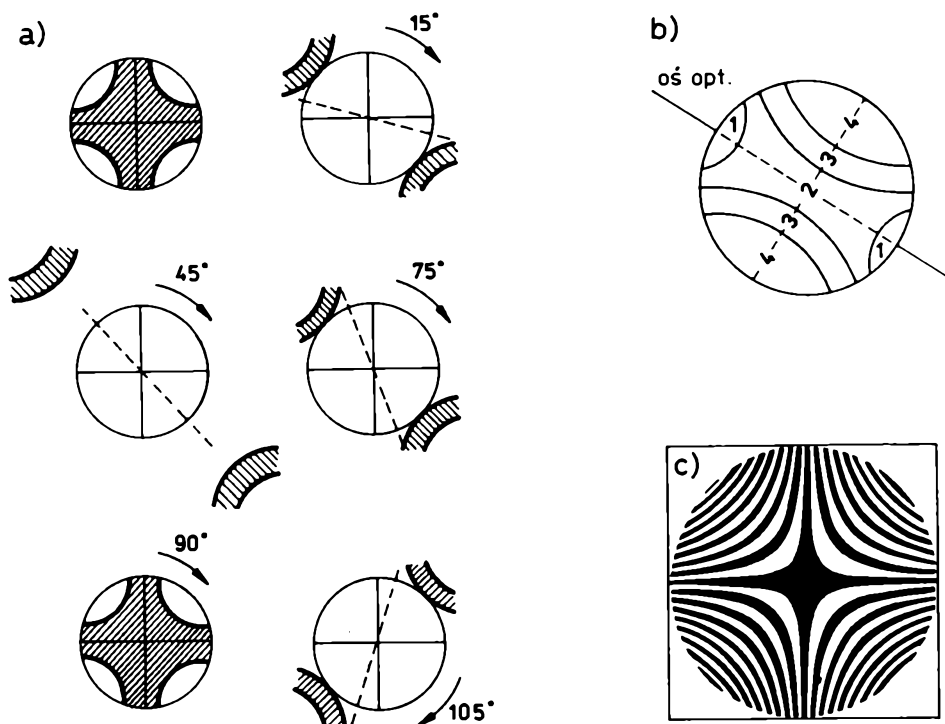
łomności mogą ich mieć nawet kilkanaście (np. kalcyt, magnezyt, dolomit). Obraz interferencyjny tak zorientowanego przekroju kryształu jednoosiowego nie zmienia się podczas rotacji preparatem mikroskopowym o  $360^\circ$ . Jeśli przekrój kryształu nie jest dokładnie prostopadły do osi optycznej, to punkt przecięcia się ramion krzyża izogir zatacza w miarę rotacji krąg — mniejszy lub większy — zależnie od wielkości kąta nachylenia płaszczyzny przekroju kryształu względem osi optycznej. Ramiona krzyża izogir pozostają w trakcie rotacji zawsze równoległe do nitek pajęczych okularu nawet w pozycji silnego nachylenia płaszczyzny przekroju kryształu względem osi optycznej, gdy w obrazie interferencyjnym widoczne są przemieszczające się w miarę rotacji naprzemiennie tylko poziome i pionowe części krzyża izogir wraz z towarzyszącymi im częściami krzywych izochromatycznych (rys. 79).



Rys. 79. Obraz interferencyjny kryształu optycznie jednoosiowego w świetle zbieżnym (przekroje kryształu skośne do osi optycznej):

a) przekrój nieco skośny, b) przekrój silnie skośny, c) zachowanie się obrazu interferencyjnego w czasie rotacji przekroju

Przekrój kryształu jednoosiowego równoległy do osi optycznej daje obraz interferencyjny w postaci grubego krzyża izogir wypełniającego niemal całe pole widzenia. W miarę obrotu preparatu stolikiem mikroskopu ramiona tego krzyża szybko rozchodzą się i zmieniają swój wygląd (rys. 80).

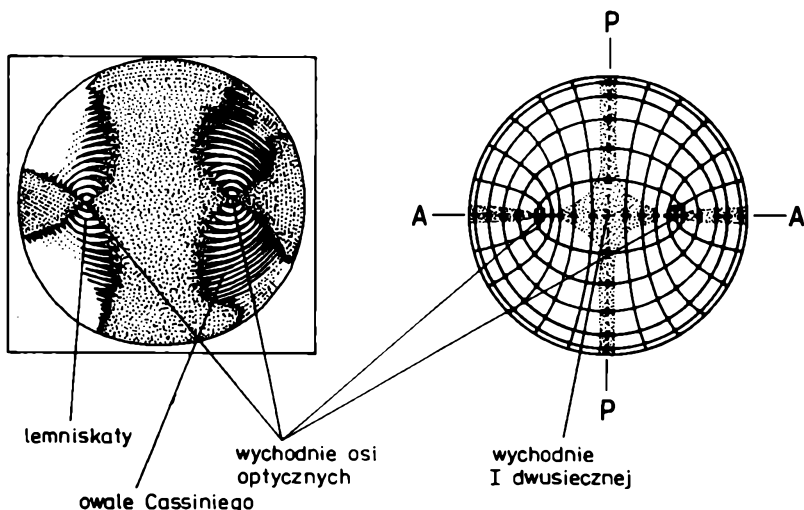


Rys. 80. Obraz interferencyjny kryształu optycznie jednoosiowego w świetle zbieżnym (przekrój kryształu równoległy do osi optycznej):

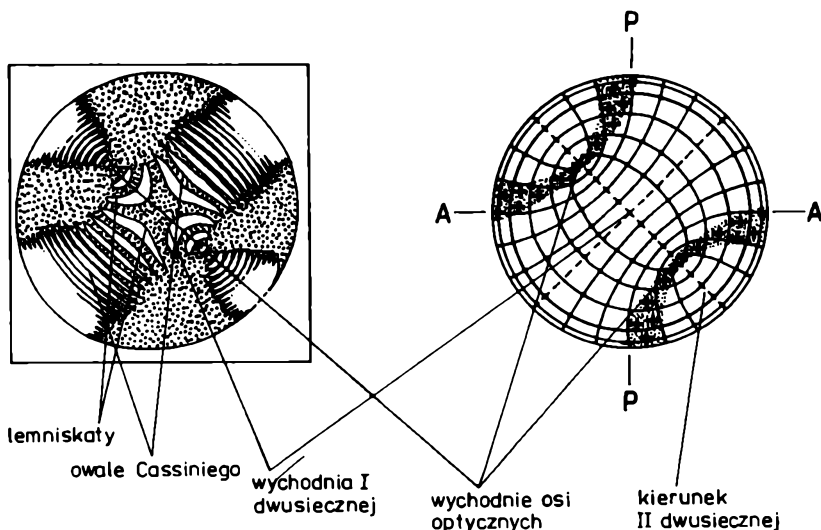
a) zachowanie się izogiry podczas rotacji przekroju stolikiem mikroskopu, b) rozmnieszczenie barw interferencyjnych w położeniu przekątnym osi optycznej, c) kształt krzywych izochromatycznych w położeniu przekątnym osi optycznej

Inny jest wygląd i zachowanie się podczas rotacji preparatu obrazów interferencyjnych kryształów dwuosiowych. Najbardziej charakterystyczne obrazy interferencyjne dają przekroje prostopadłe do pierwszej dwusiecznej lub jednej z osi optycznych. Natomiast mniej charakterystyczne są obrazy interferencyjne przekrojów równoległych do płaszczyzny osi optycznych (prostopadłych do normalnej optycznej), są bowiem bardzo podobne do obrazu interferencyjnego kryształu jednoosiowego w przekroju równoległym do osi optycznej (przekroju głównego), szczególnie gdy kąt osi optycznych jest mały.

Krzywe izochromatyczne przekrojów prostopadłych do pierwszej dwusiecznej mają postać lemniskat i owali Cassiniego (rys. 81). Izogira takiego przekroju w położeniu równoległym płaszczyzny osi optycznych do płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów ma kształt krzyża, którego ramię łączące ślady wychodni osi optycznych jest wąskie, a ramię prostopadłe jest szerokie (rys. 81). Po rotacji preparatem mikroskopowym o  $45^\circ$  (położenie przekątne) izogira rozdziela się na dwa ramiona hiperboliczne, a linia łącząca wierzchołki tych hiperboli wskazuje kierunek II dwusiecznej (rys. 82).



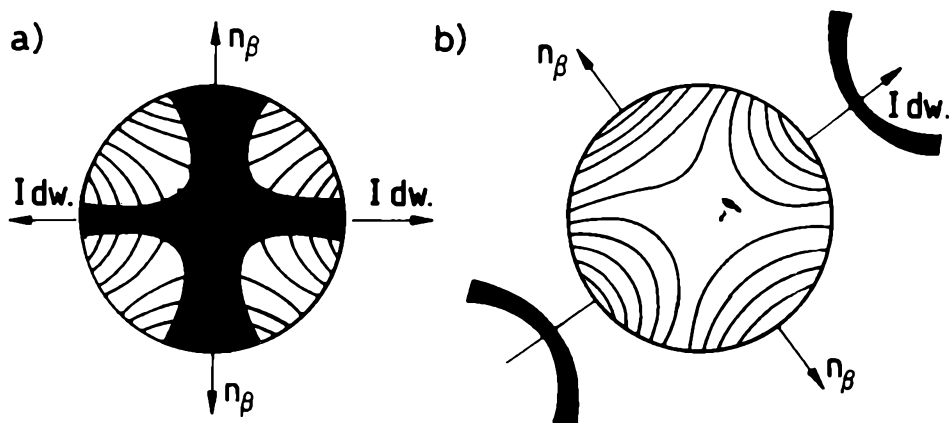
**Rys. 81. Obraz interferencyjny kryształu dwuosowego w świetle zbieżnym — przekrój prostopadły do pierwszej dwusiecznej w położeniu równoległym płaszczyzny osi optycznych do płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów**



**Rys. 82. Obraz interferencyjny kryształu optycznie dwuosowego w świetle zbieżnym — przekrój prostopadły do pierwszej dwusiecznej w położeniu  $45^\circ$  płaszczyzny osi optycznych względem płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów**

Obraz interferencyjny kryształu dwuosowego przeciętego prostopadłe do II dwusiecznej jest podobny do obrazu interferencyjnego kryształu dwuosowego o dużym kącie osi optycznych, przeciętego prostopadłe do I dwu-

siecznej. W takim obrazie interferencyjnym, w położeniu równoległym do płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów, widoczne są fragmenty krzywych izochromatycznych oraz szerokie ramię krzyża izogir wskazujące kierunek normalnej optycznej ( $n_\beta$ ) i wąskie ramię krzyża izogir, wskazujące kierunek I dwusiecznej. Krzyż izogir rozdziela się na dwie hiperbole uchodzące z pola widzenia po dokonaniu rotacji przekrojem kryształu o pewien kąt. Linia łącząca wierzchołki tych hiperbol wskazuje kierunek I dwusiecznej (rys. 83b).



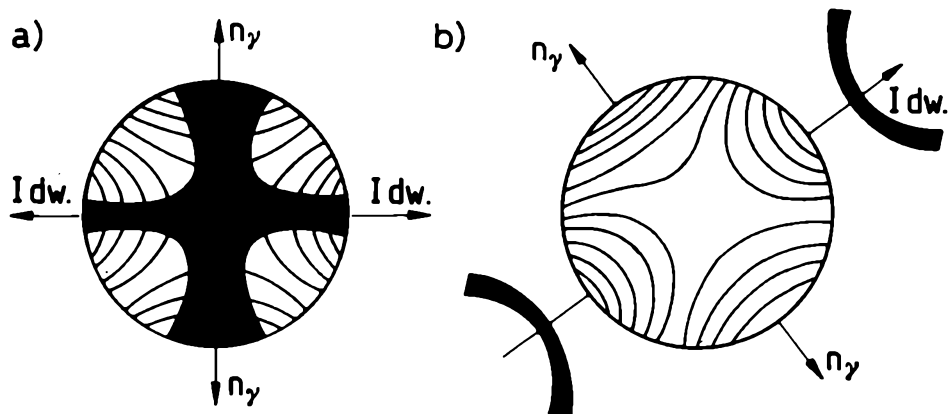
Rys. 83. Obraz interferencyjny kryształu optycznie dwuosowego w świetle zbieżnym — przekrój prostopadły do drugiej dwusiecznej:

a) w położeniu równoległym płaszczyzny osi optycznych do płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów, b) w położeniu  $45^\circ$  płaszczyzny osi optycznych względem płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów

Obraz interferencyjny kryształu dwuosowego przeciętego prostopadłe do normalnej optycznej (tj. równoległe do płaszczyzny osi optycznych) jest dość podobny do obrazu przekroju prostopadłego do II dwusiecznej lub przekroju równoległego do osi optycznej kryształów jednoosiowych. W takim obrazie interferencyjnym krzyż izogir wypełnia prawie całe pole widzenia, gdy pierwsza albo druga dwusieczna są równoległe do płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów i rozdziela się na dwie szybko uchodzące z pola widzenia hiperbole po rotacji przekrojem kryształu o niewielki kąt ( $7^\circ$ — $12^\circ$ ). Tak szybkie znikanie izogir pozwala odróżnić przekrój prostopadły do normalnej optycznej od przekroju prostopadłego do II dwusiecznej. Linia łącząca wierzchołki uchodzących z pola widzenia hiperbol wskazuje kierunek pierwszej dwusiecznej, podobnie jak w przekroju prostopadłym do II dwusiecznej (rys. 84).

Obraz interferencyjny kryształu dwuosowego prostopadły do jednej z osi optycznych składa się z prawie kołowych krzywych izochromatycznych,



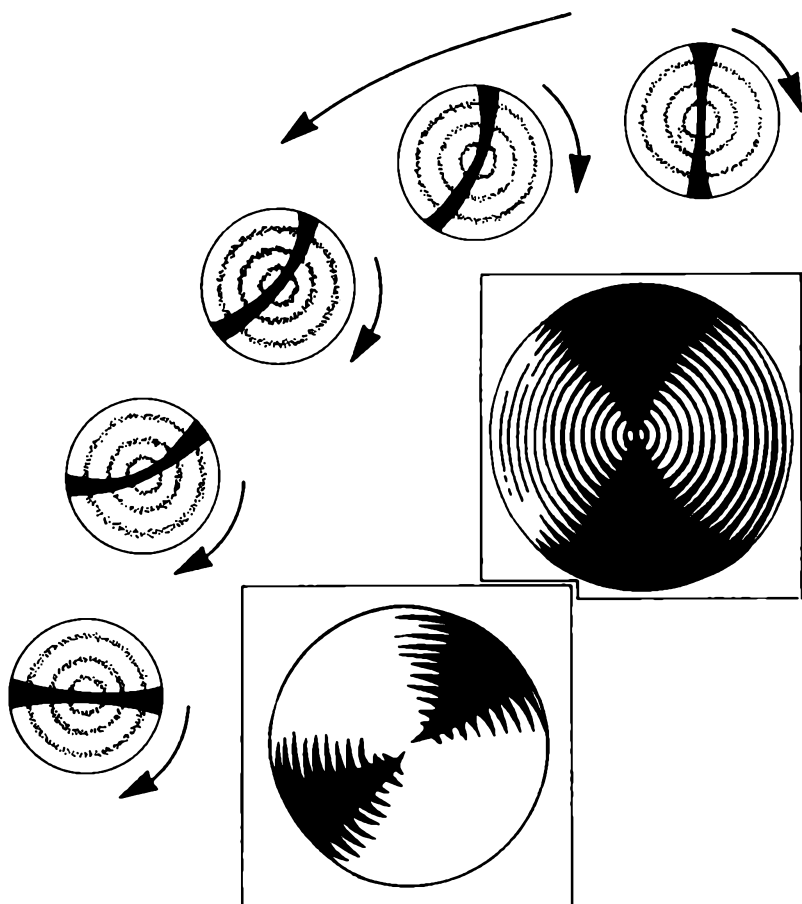


Rys. 84. Obraz interferencyjny kryształu optycznie dwuosowego w świetle zbieżnym (przekrój prostopadły do normalnej optycznej):

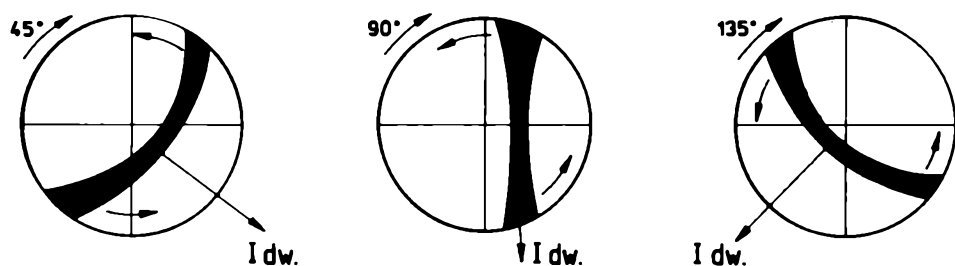
a) w położeniu równoległym, b) w położeniu przekątnym

których kolejność pokrywa się z porządkiem barw interferencyjnych klina kwarcowego (z użyciem światła białego) i z pojedynczego ramienia izogiry zwięzającej się ku środkowi. Krzywych izochromatycznych w takim obrazie interferencyjnym jest tym więcej, im wyższa jest dwójłomność przekroju kryształu lub im grubszy jest preparat. Podczas obrotu preparatu mikroskopowego izogira pozostaje w polu widzenia, rotując przeciwnie do kierunku obrotu stolika (rys. 85). Gdy podczas obrotu preparatu płaszczyzna osi optycznych pokryje się z płaszczyzną drgań jednego z polaroidów, wówczas izogira wyprostowuje się, a jej kierunek zlewa się z kierunkiem drgań jednego z polaroidów (polaryzatora lub analizatora). Gdy płaszczyzna osi optycznych przekroju kryształu znajdzie się w położeniu przekątnym względem płaszczyzn drgań polaroidów (po obrocie o  $45^\circ$  od poprzedniego położenia), izogira także znajdzie się w położeniu przekątnym. Jest ona wówczas najbardziej wygięta i to tym silniej, im większy jest kąt osi optycznych. Wygięcie izogiry wskazuje zawsze kierunek I dwusiecznej (rys. 86). Gdy kąt  $2V = 90^\circ$ , wtedy izogira jest prosta.

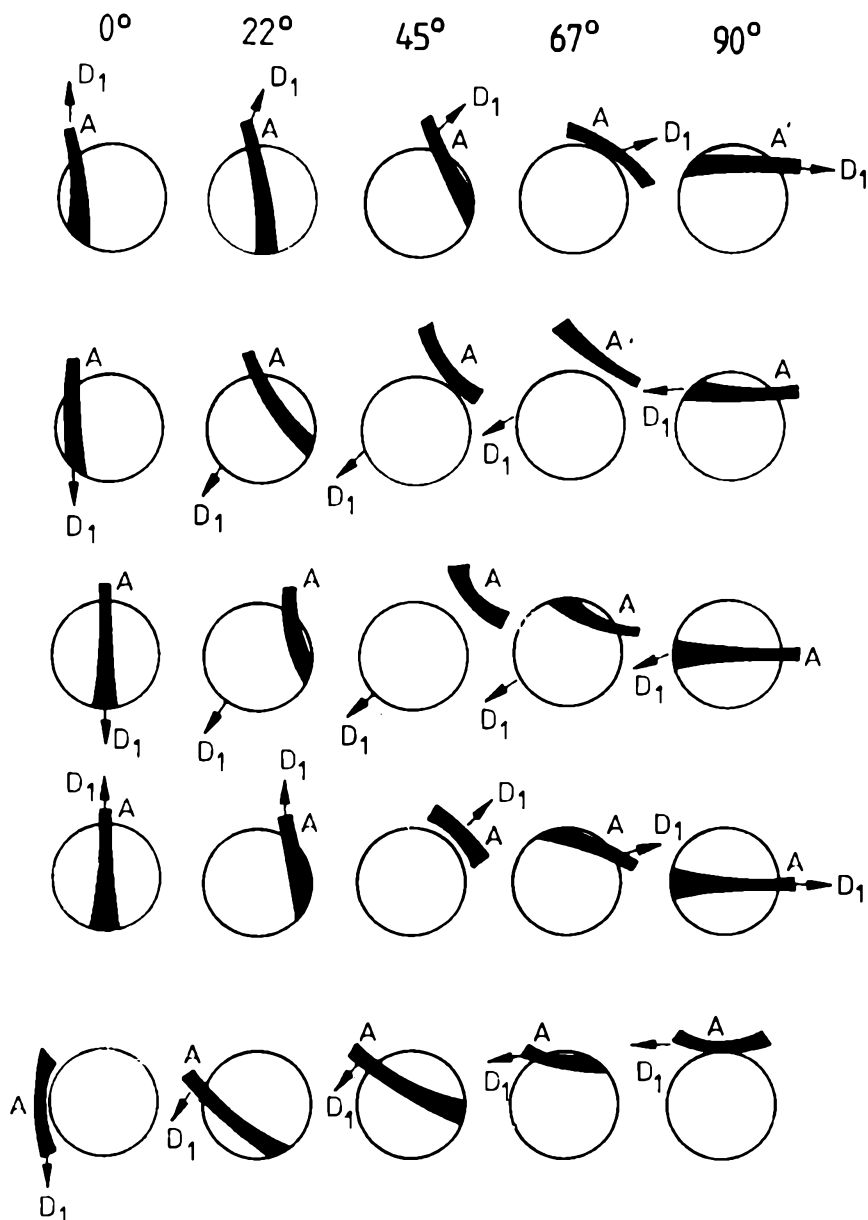
Obraz interferencyjny kryształu dwuosowego przeciętego skośnie względem osi optycznych i głównych wektorów optycznych ( $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$ ) jest złożony z wygiętych ramion izogir przesuwających się kolejno w polu widzenia w miarę rotacji preparatem (rys. 87). Od obrazów interferencyjnych kryształów jednoosiowych przeciętych skośnie do osi optycznej różnią się tym, że ramiona izogir przechodząc przez środek pola widzenia, w ogólnym przypadku nie są równoległe do płaszczyzny polaryzacji jednego z polaroidów. Wygięte i nachylone skośnie względem nitek krzyża pajęczego ramie izogiry wykonuje



Rys. 85. Obraz interferencyjny kryształu optycznie dwuosiowego w świetle zbieżnym (przekrój prostopadły do jednej z osi optycznych)



Rys. 86. Obraz interferencyjny kryształu optycznie dwuosiowego w świetle zbieżnym (przekrój prawie prostopadły do jednej z osi optycznych)



Rys. 87. Zmiana położenia izogir podczas rotacji przekroju kryształu dwuosowego przeciętego skośnie względem osi optycznych i głównych wektorów optycznych

podczas rotacji preparatu jednym końcem ruch antydromiczny (przesuwa się przeciwnie do kierunku rotacji stolikiem mikroskopu), a drugim końcem ruch homodromiczny (zgodny z kierunkiem rotacji stolika mikroskopu). Takie prze-

kroje pozwalają odróżnić kryształ jednoosiowy od dwuosiowego, lecz nie nadają się do dalszych oznaczeń optycznych w świetle zbieżnym (np. znaku optycznego).

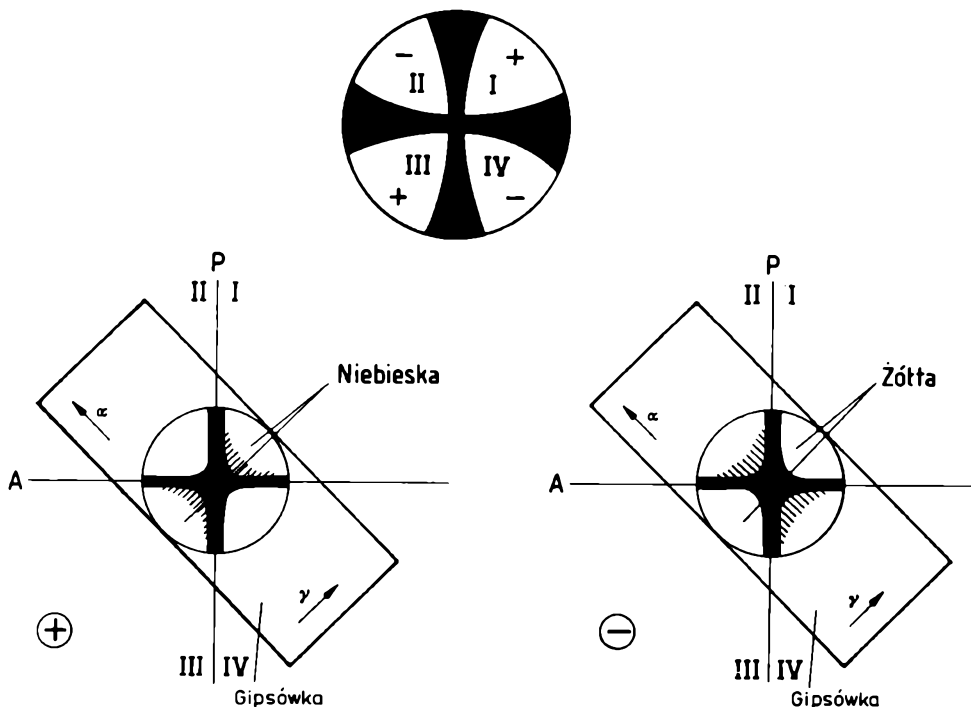
## 18.6.2. Określanie znaku optycznego kryształów

Charakter optyczny kryształu anizotropowego określa się konoskopowo z wykorzystaniem jednej z płytek pomocniczych lub kompensatora obrotowego.

Znak optyczny kryształu jednoosiowego określa reguła Rinnego:

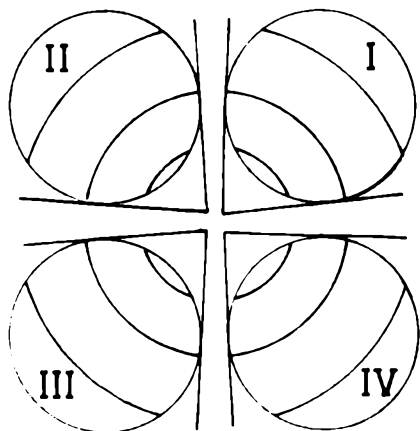
- prosta, w przekrojach prostopadłych lub skośnych do osi optycznej,
- odwrotna, w przekrojach równoległych do osi optycznej.

Pole widzenia w okularze mikroskopu jest podzielone nitkami krzyża pajączego na kwadranty (ćwiartki). Oznacza się je cyframi rzymskimi: I, II, III, IV. Ćwiartki: I, czyli prawa górna i III, czyli lewa dolna, są określane mianem ćwiartek dodatnich, a ćwiartki: II, czyli lewa górna i IV, czyli prawa dolna, są ćwiartkami ujemnymi (rys. 88). Wprowadzenie płytki pomocniczej w bieg strumienia światła zbieżnego powoduje zmianę wysokości barw krzywych izo-



Rys. 88. Podział obrazu interferencyjnego krzyżem izogir na kwadranty i określenie charakteru optycznego kryształu za pomocą gipsówki (a)

chromatycznych konoskopowego obrazu interferencyjnego. Izogiry uzyskują barwę interferencyjną zastosowanej płytki pomocniczej, a krzywe izochromatyczne podwyższają lub obniżają wysokość barwy interferencyjnej zależnie od znaku optycznego kryształu i kwadrantu, do którego należą.



Rys. 89. Położenie ramion krzyża izogir i krzywizny krzywych izochromatycznych w poszczególnych ćwiartkach przekrojów skośnych względem osi optycznej kryształów jednoosiowych optycznie

Prosta reguła Rinnego ustanawia, że jeśli płytka pomocnicza, której mniejszy wektor optyczny jest równoległy do dłuższej krawędzi oprawki, jest wsuwana w kierunku kwadrantów ujemnych (II i IV), to podwyższenie barw interferencyjnych obrazu konoskopowego w ćwiartkach dodatnich (I i III) oznacza kryształ optycznie dodatni, a podwyższenie barw interferencyjnych w ćwiartkach ujemnych (II i IV) oznacza kryształ ujemny.

W kryształach jednoosiowych wszystkie ćwiartki są widoczne jednocześnie tylko w obrazie konoskopowym uzyskiwanym na przekrojach prostopadłych lub prawie prostopadłych do osi optycznej. W przekrojach skośnych do osi optycznej konieczne jest

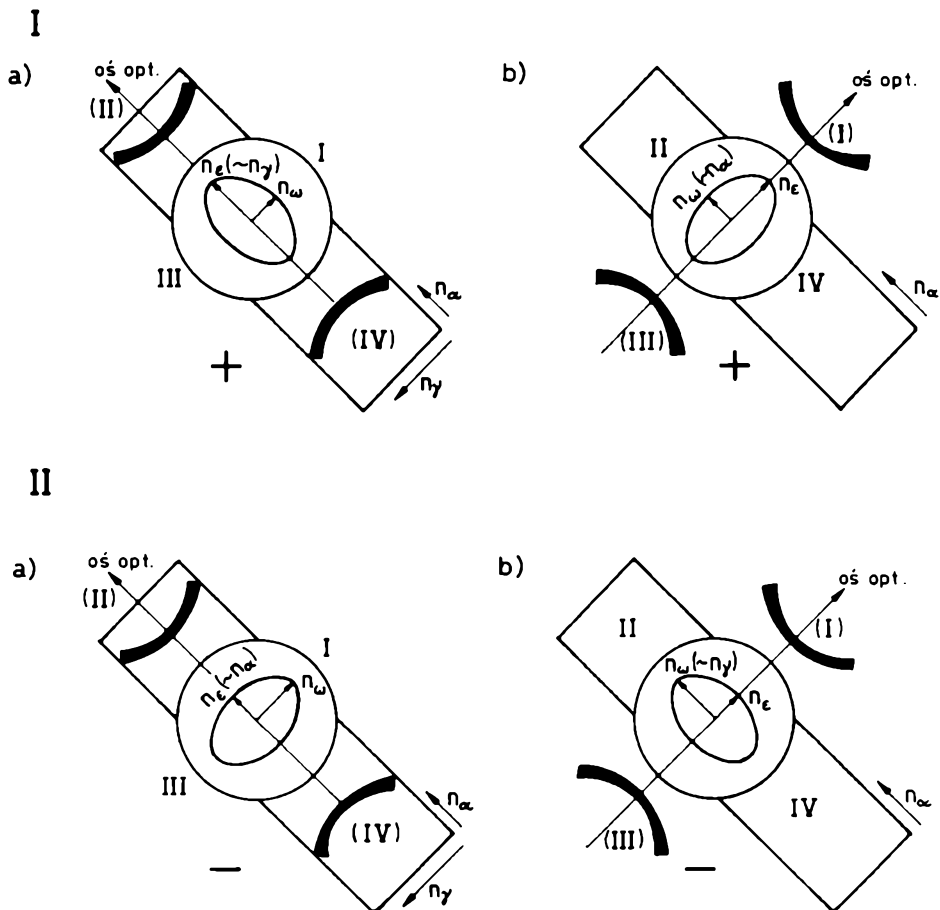
określenie numeracji ćwiartek na podstawie kształtu krzywych izochromatycznych i kierunku ruchu ramion krzyża izogir w trakcie rotacji przekroju kryształu stolikiem mikroskopu (rys. 89).

W przekrojach równoległych do osi optycznej kryształów jednoosiowych optycznie obowiązuje odwrotna reguła Rinnego. Powiada ona, że jeśli w kierunku ćwiartek ujemnych wsuwamy płytkę pomocniczą, której mniejszy wektor optyczny jest równoległy do dłuższej krawędzi oprawki, to wzrost barwy interferencyjnej w kwadrantach dodatnich oznacza ujemny znak optyczny, a wzrost barwy interferencyjnej w kwadrantach ujemnych oznacza dodatni znak optyczny kryształu.

Wzrostowi barwy interferencyjnej w kwadrantach dodatnich towarzyszy jednocześnie obniżenie się barwy interferencyjnej w kwadrantach ujemnych i odpowiednio wzrostowi barwy interferencyjnej w kwadrantach ujemnych towarzyszy jednocześnie jej obniżenie w kwadrantach dodatnich.

Jeżeli płytka cienka jest rezultatem przecięcia indykatrixy kryształu jednoosiowego równoległe do osi optycznej, to kierunek rozejścia się ramion krzyża izogir, przekształcającego się w czasie rotacji preparatu w ramiona hiperbol, określa kierunek osi optycznej, który jest zgodny z wektorem optycznym  $n_z$  indykatrixy i prostopadły do wektora optycznego  $n_o$ . Jeśli

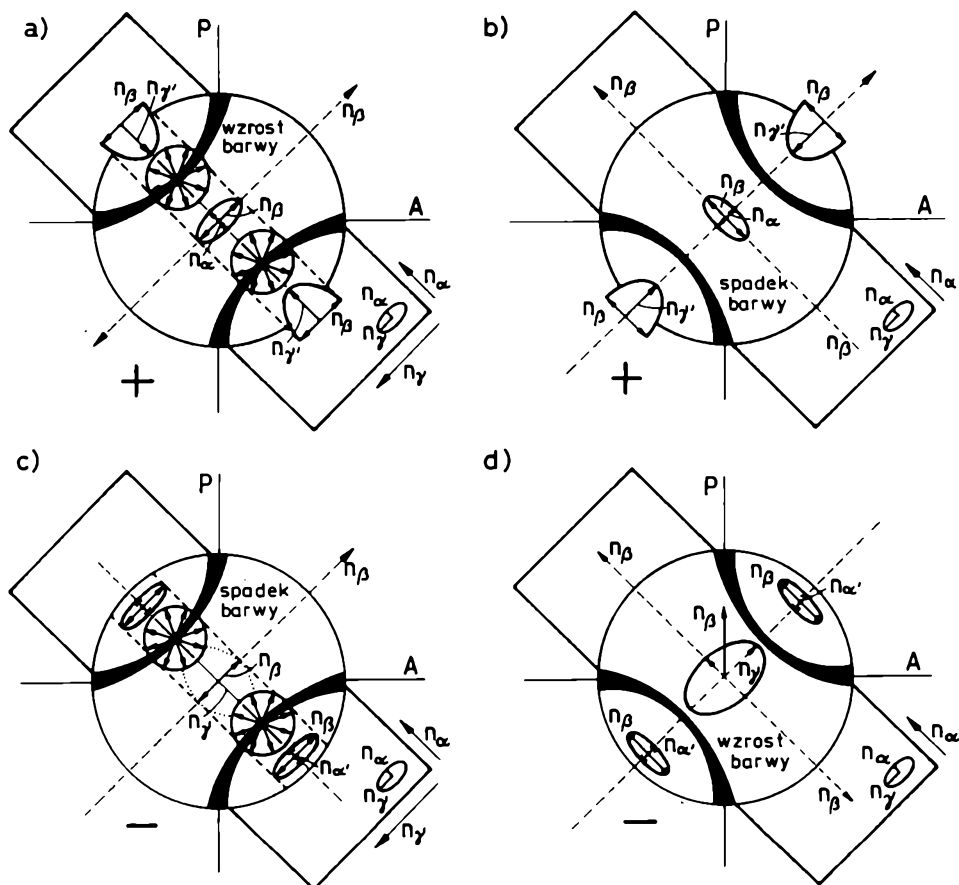
izogiry uchodzą podczas rotacji przekroju kryształu w kierunku kwadrantów ujemnych (II i IV), to pole widzenia wypełniają zlewające się ze sobą ćwiartki dodatnie (I i III), a jeśli izogiry uchodzą w kierunku kwadrantów dodatnich (I i III), to pole widzenia zostaje zajęte przez zlewające się ze sobą ćwiartki ujemne (II i IV, rys. 90).



Rys. 90. Reakcja optyczna z gipsówką przekroju kryształu jednoosiowego przeciętego równoległe do osi optycznej:

I — kryształ jednoosiowy optycznie dodatni (spadek barwy interferencyjnej w kwadrantach dodatnich i wzrost w kwadrantach ujemnych), II — kryształ jednoosiowy ujemny (wzrost barwy interferencyjnej w kwadrantach dodatnich i spadek barwy interferencyjnej w kwadrantach ujemnych)

Znak optyczny kryształu dwuosiowego określa reguła Rinnego, podobnie jak kryształu jednoosiowego:



Rys. 91. Reakcje optyczne z gipsówką kryształu dwuosowego w przekroju prostopadłym do pierwszej dwusiecznej:

a), b) kryształ dodatni optycznie, c), d) kryształ ujemny optycznie

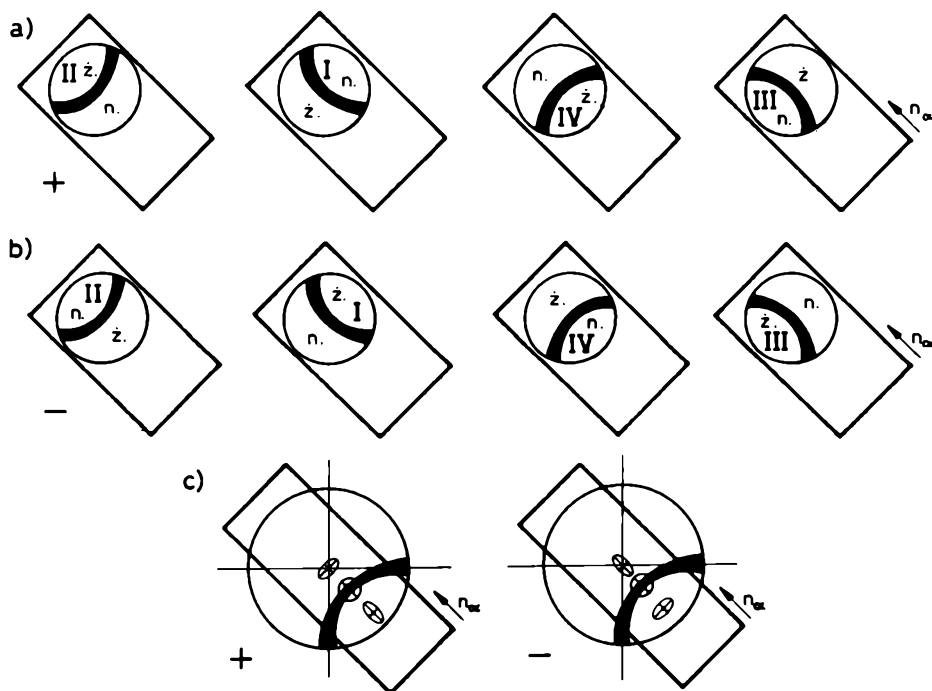
- prosta, w przekrojach prostopadłych do pierwszej dwusiecznej lub do jednej z osi optycznych,
- odwrotna, w przekrojach prostopadłych do drugiej dwusiecznej lub do normalnej optycznej, czyli równoległych do płaszczyzny osi optycznych.

Charakter optyczny kryształu dwuosowego najdogodniej określa się w przekrojach prostopadłych do pierwszej dwusiecznej lub w przekrojach prostopadłych do jednej z osi optycznych. W pozostałych przekrojach kryształów dwuosowych występują zasadnicze trudności w ustalaniu numeracji i znaku ćwiartek dzielących obraz interferencyjny. Jednak w preparatach skalnych, w których występuje bardzo wiele różnie zorientowanych przekrojów

tego samego minerału, można dość łatwo wyszukać odpowiedni przekrój minerału, najbardziej dogodny do zamierzonych oznaczeń.

Wykorzystując do określenia znaku optycznego przekrój kryształu dwuosowego, prostopadły do pierwszej dwusiecznej, należy obrotem stolika mikroskopu doprowadzić do takiego położenia, żeby płaszczyzna osi optycznych tego przekroju tworzyła kąt  $45^\circ$  z kierunkami drgań polaroidów. W takim położeniu przekroju kryształu granicę pól dodatnich i ujemnych stanowią hiperboliczne izogiry (rys. 91). Stosując prostą regułę Rinnego, można zatem ustalić znak optyczny kryształu po wprowadzeniu płytki pomocniczej, która podwyższa lub obniża wysokość barw interferencyjnych w ćwiartkach dodatnich i ujemnych, zależnie od znaku optycznego kryształu.

W przekrojach prostopadłych lub prawie prostopadłych do jednej z osi optycznych kryształu dwuosowego określa się znak optyczny podobnie jak w przekrojach prostopadłych do pierwszej dwusiecznej — prostą regułą Rinnego. Oznaczenia ćwiartek dokonuje się na podstawie kształtu hiperbolicznej izogiry, która swą wypukłością jest zwrócona w stronę pierwszej dwusiecznej, a wklęsłością w stronę drugiej dwusiecznej (rys. 92). Brak wklęsnięcia



Rys. 92. Reakcje optyczne kryształu dwuosowego w przekroju prostopadłym do jednej z osi optycznych:

a) reakcje optyczne z gipsówką kryształu dodatniego, b) reakcje z gipsówką kryształu ujemnego, c) eliptyczne przekroje indyktrysy odpowiadające porzeczonym częściom obrazu osiowego



i wypukłości izogiry oznacza kryształ o dużym kącie osi optycznych ( $2V = 90^\circ$ ), którego znaku optycznego nie można określić (kryształ dodatnio-ujemny).

### 18.6.3. Pomiar kąta osi optycznych

Kąt osi optycznych można zmierzyć w sposób przybliżony wprost z obrazu interferencyjnego kryształu w przekroju prostym do pierwszej dwusiecznej (rys. 82), w którym wierzchołki hiperbol wskazują położenia wychodni osi optycznych. Odległość między wierzchołkami hiperbol (kąt rzeczywisty  $2D$ ), którą można zmierzyć podziałką mikrometryczną (rys. 96a), zależy od pozornego kąta osi optycznych ( $2E$ ) i stałej Mallarda ( $K$ ), określanej oddzielnie dla każdego układu optycznego (okular mikrometryczny + obiektyw).

Stałą Mallarda można wyznaczyć empirycznie dla każdego układu optycznego za pomocą płytki cienkiej kryształu o znanym kącie osi optycznych.

$$\sin E = \frac{D}{K},$$

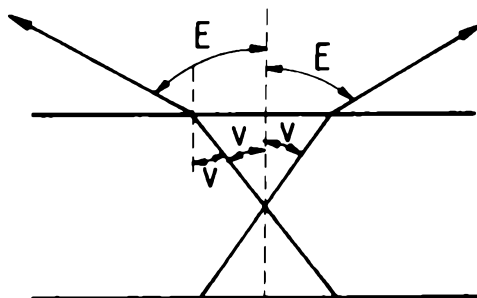
gdzie:

$E$  — połowa pozornego kąta osi optycznych,

$D$  — połowa odległości między śladami wychodni osi optycznych mierzona podziałką mikrometryczną,

$K$  — stała Mallarda.

Różnica między rzeczywistym kątem osi optycznych ( $2V$ ) a ich kątem pozornym ( $2E$ ) jest spowodowana odchyleniem promieni przenikających przez przekrój kryształu zależnym od wartości współczynnika załamania światła  $n_\beta$  (rys. 93). Zatem:



Rys. 93. Rzeczywisty ( $2V$ ) i pozorny ( $2E$ ) kąt osi optycznych

$$\sin V = \frac{\sin E}{n_p},$$

gdzie:

- $V$  — połowa rzeczywistego kąta osi optycznych,
- $E$  — połowa pozornego kąta osi optycznych,
- $n_p$  — wartość współczynnika załamania światła w kierunku normalnej optycznej kryształu.

Znajomość wartości  $n_p$  nie jest konieczna w sytuacji, gdy dysponujemy przekrojami prostopadłymi do pierwszej i drugiej dwusiecznej tego samego minerału, gdyż:

$$\operatorname{tg} V = \frac{\sin E}{\sin E_1},$$

gdzie:

- $V$  — kąt zawarty między osią optyczną i pierwszą dwusieczną, czyli połowa rzeczywistego kąta osi optycznych,
- $E$  — połowa kąta pozornego osi optycznych zmierzona w przekroju prostopadłym do pierwszej dwusiecznej,
- $E_1$  — połowa kąta pozornego osi optycznych zmierzona w przekroju prostopadłym do drugiej dwusiecznej.

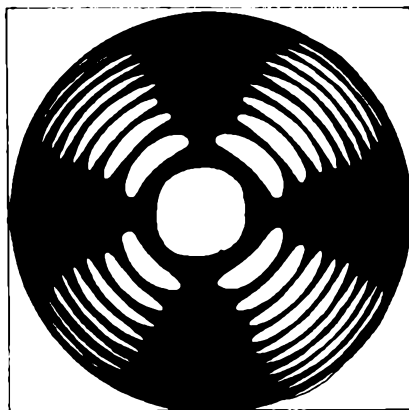
Pomiaru pozornego kąta osi optycznych dokonuje się także za pomocą tzw. konometru, czyli swoistej odmiany mikroskopu polaryzacyjnego, przystosowanej tylko do badań w świetle zbieżnym i umożliwiającej precyzyjne pomiary goniometryczne na obracanych wokół osi preparacie. Do pomiarów konometrycznych nadają się tylko preparaty dostatecznie grube, tak by smugi izogir były wystarczająco wąskie.

Współcześnie najlepszym instrumentem do pomiaru kąta osi optycznych (2V) jest stolik uniwersalny (patrz rozdz. 19.1), który umożliwia precyzyjne określenie tej wartości w preparacie mikroskopowym ortoskopowo lub konoskopowo.

#### 18.6.4. Badanie skręcenia płaszczyzny polaryzacji

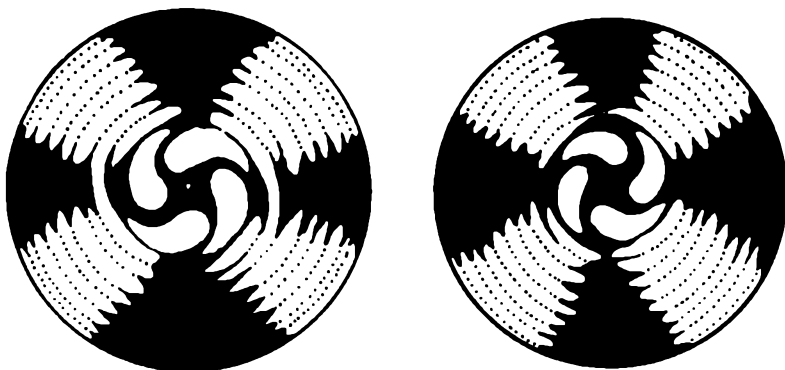
Kryształy skręcające płaszczyznę polaryzacji (kryształy optycznie czynne) dają obraz interferencyjny różniący się od analogicznego obrazu zwykłych kryształów anizotropowych, szczególnie w preparatach grubszych.

Różnica ta dla kryształów jednoosiowych optycznie czynnych wyraża się obecnością jasnego, barwnego pola, rozdzielającego nie dochodzące do środka pola widzenia ramiona krzyża izogir i występuje tylko w przekrojach prostopadłych lub prawie prostopadłych do osi optycznej kryształu (rys. 94).



Rys. 94. Obraz interferencyjny kryształu optycznie czynnego (jednoosiowego) przeciętego prostopadle do osi optycznej)

Nałożone na siebie płytki krystaliczne, skręcające płaszczyznę polaryzacji światła w prawo i w lewo, dają w efekcie obraz interferencyjny zawierający w centralnej części pola widzenia tzw. spirale Airy'ego (rys. 95), zwrócone w prawo, gdy płytka prawoskrętna leży pod lewoskrętną i odpowiednio w lewo, gdy płytka lewoskrętna leży pod prawoskrętną.



Rys. 95. Spirale Airy'ego

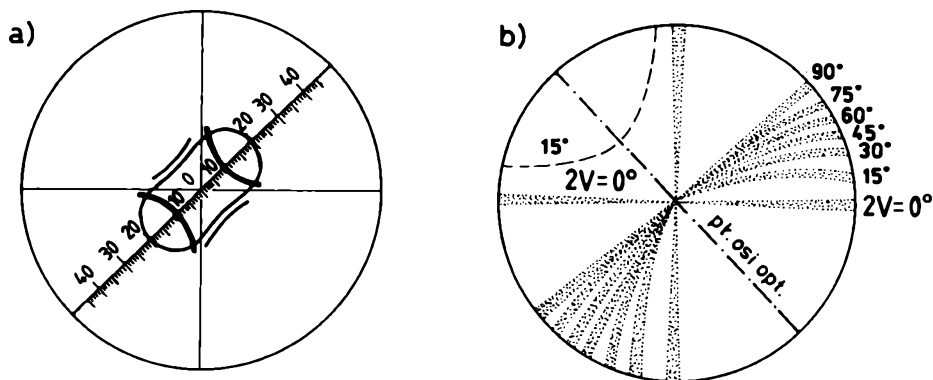
W kryształach dwuosiowych skrócenie płaszczyzny polaryzacji jest zjawiskiem rzadko spotykanym, głównie w kryształach niektórych związków organicznych i bywa różne dla każdej osi optycznej takiego kryształu (np. w cukrze trzcinowym, tj. sacharozie), szczególnie gdy osie optyczne nie są wzajemnym powtórzeniem symetrii optycznej względem symetrii geometrycznej kryształu. Wartość kąta skrócenia płaszczyzny polaryzacji można określić, stosując światło monochromatyczne i obracając analizator do całkowitego

ściemnienia centralnej części obrazu interferencyjnego (miejsca przecięcia się ramion krzyża izogir). Stosując światło białe, można rozpoznać kryształ polaryzujący światło lewo- i prawoskrętnie. W miarę rotacji analizatora w kryształach prawoskrętnym następuje zmiana barw interferencyjnych w środkowej części obrazu interferencyjnego w porządku malejącym, a w kryształach lewoskrętnym — odpowiednio w porządku rosnącym.

### 18.6.5. Określanie dyspersji dwójłomności i kąta osi optycznych

Obraz interferencyjny kryształu dwuosowego charakteryzującego się silną dyspersją dwójłomności, przeciętego prostopadłe do pierwszej dwusiecznej lub osi optycznej, ukazuje brunatnawy i niebieskawy cień po obu stronach izogir. Gdy po wypukłej stronie izogiry występuje cień brunatny, zostaje wygaszona niebieska część widma światła białego, a kąt osi optycznych dla tej barwy jest mniejszy niż dla barwy czerwonej ( $\rho > \nu$ ). Gdy zaś po wypukłej stronie izogiry występuje cień niebieski, zostaje wygaszona część czerwona widma, a kąt osi optycznych dla tej barwy jest mniejszy niż dla barwy niebieskiej ( $\rho < \nu$ ).

W obrazie interferencyjnym zatem można zmierzyć wartość kąta osi optycznych, posługując się raz światłem monochromatycznym czerwonym, a raz światłem monochromatycznym niebieskim. Pomiaru kąta osi optycznych dokonuje się okulem mikrometrycznym lub na podstawie oceny stopnia zmiany wygięcia ramienia hiperboli w położeniu, gdy płaszczyzna osi optycznych tworzy kąt  $45^\circ$  z kierunkiem drgań polaryzatora i analizatora (rys. 96).



Rys. 96. Pomiar odległości między wierzchołkami hiperboli a okulem mikrometrycznym (w przekroju prostopadłym do pierwszej dwusiecznej — a) oraz wykres określający w przybliżeniu wartość kąta osi optycznych ( $2V$ ) w przekroju prostopadłym do osi optycznej na podstawie stopnia wygięcia izogiry — b))

Dość wyraźna zmiana dyspersji dwójłomności i kąta osi optycznych bywa wywoływana już niewielkimi zmianami składu chemicznego niektórych minerałów, co wykorzystuje się do szybkiej i względnie dokładnej analizy chemicznej nawet mikroskopowej wielkości ziarn mineralnych (np. do oznaczania zawartości argonu, produktu rozpadu promieniotwórczego  $^{40}\text{K}$  w celu oznaczenia wieku bezwzględnego niektórych minerałów).

## **18.7. Badania w świetle spolaryzowanym odbitym**

Światło odbite od wypolerowanej powierzchni preparatu mikroskopowego (zglądu) stosuje się głównie do optycznej analizy minerałów nieprzezroczystych. Badania optyczne minerałów nieprzezroczystych prowadzi się z użyciem światła spolaryzowanego równoległego lub zbieżnego. Realizuje się je z zastosowaniem jednego lub dwu polaroidów.

Badania mikroskopowe minerałów nieprzezroczystych (głównie kruszców) zapoczątkowano dopiero w bieżącym stuleciu po rozwiązaniu podstawowych problemów teoretycznych i konstrukcyjnych mikroskopu kruszczowego. Początkowo podstawowym kryterium mikroskopowej identyfikacji minerałów nieprzezroczystych były rezultaty reakcji mikrochemicznych oraz ocena barwy przekroju. Później uzupełniono je o badanie twardości (mikrotwardościomierze), izo- i anizotropowości, zdolności refleksyjnej, dwójodbicia oraz refleksów wewnętrznych. Dopiero zupełnie niedawno ustanowiono jednolity tok postępowania w mikroskopowej identyfikacji minerałów nieprzezroczystych. Badanie mikrotwardości oraz precyzyjny pomiar zdolności refleksyjnej uznano za podstawowe parametry identyfikacyjne. Pozostałe cechy identyfikacyjne traktuje się uzupełniająco. Obecnie udaje się już identyfikować metodą mikroskopową ziarna, których wielkość nie jest mniejsza niż 25—50  $\mu\text{m}$ .

### **18.7.1. Mikroskopowa ocena twardości kryształu (minerału)**

Opór stawiany przez minerał zewnętrznemu działaniu mechanicznemu, zmierzającemu do zarysowania lub innego naruszenia powierzchni określa się mianem twardości.

Najprostszym sposobem oceny twardości minerału pod mikroskopem jest próba naruszenia jego powierzchni wypolerowanej za pomocą igły miedzianej i stalowej. Na podstawie rezultatu naruszenia powierzchni polerowanej minerału wyróżniono następujące stopnie twardości:

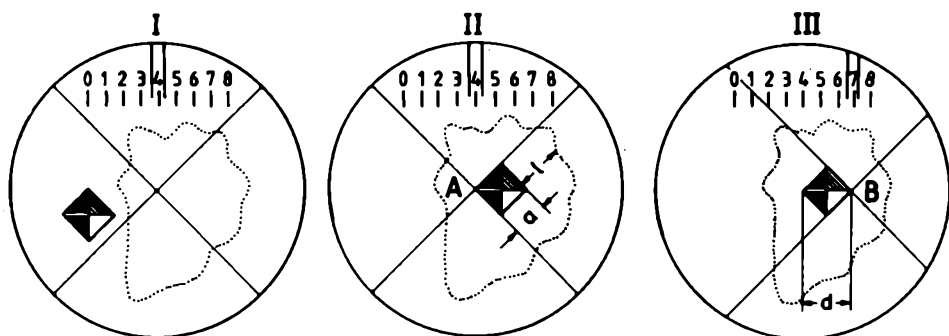
- miękkie,
- średnio twarde,
- twarde.

Sklerometryczny pomiar twardości pozwolił wprowadzić skalę opierającą się na wzorcach (tzw. skalę twardości Talmage'a):

- A — argentyt (najmniej twardy),
- B — galena,
- C — chalkopiryt,
- D — tetraedryt,
- E — nikielin,
- F — magnetyt,
- G — ilmenit (najtwardszy).

Podczas polerowania preparatów polimineralnych powstaje tzw. relief (zewnątrzny). Minerale o większej twardości, bardziej odporne, wystają nieco ponad powierzchnię minerałów o mniejszej twardości, szybciej ścierających się w trakcie polerowania. W rezultacie podczas obserwacji mikroskopowych można dostrzec subtelną smugę świetlną tworzącą się wzdłuż granic ziarn, na podobieństwo smugi Beckego, zmieniającą położenie w trakcie ruchu tubusa mikroskopu. Smuga ta podczas unoszenia tubusa przemieszcza się w kierunku minerału o mniejszej twardości, bardziej zagłębionego w powierzchnię preparatu. Na tej podstawie opracowano siedem klas twardości względnej ważniejszych minerałów kruszczowych i towarzyszących:

- I — jodargiryt (o najmniejszej twardości), argentyt, arsen rodzimy,
- II — galena, cerusyt, miedź rodzima,
- III — bornit, baryt, dolomit,
- IV — chalkozyn, tetraedryt, sfaleryt,
- V — nikielin, pirotyt,
- VI — löllingit, magnetyt, wolframit,
- VII — ilmenit, chromit, markasyt, kwarc.



Rys. 97. Etapy pomiaru mikrotwardości. Kwadrat — ślad piramidki diamentowej o boku  $a$  i przekątnej  $d$ ,  $l$  — odległość od brzegu przekroju mierzonego kryształu, linia przerywana — kontur kryształu;

I, II, III — etapy wykonywanego pomiaru

Jednak najdokładniejszą ocenę twardości minerału można uzyskać mikroskopowo dopiero za pomocą mikrotwardościomierza. Metoda ta opiera się na pomiarze wielkości odcisku pozostawionego na powierzchni minerału przez standaryzowaną piramidkę diamentową (rys. 97) i przeliczeniu go na mikrotwardość według wzorów:

$$MTw = \frac{P \cdot n}{F} \left[ \text{kG/mm}^2 \right],$$

$$VHN = \frac{P \cdot n}{d^2},$$

gdzie:

- VHN — mikrotwardość (Vickers Hardness Number),
- MTw — mikrotwardość,
- P — obciążenie piramidki standaryzowanej (np. diamentowej),
- F — powierzchnia odcisku (w mm<sup>2</sup>),
- n — współczynnik uwarunkowany,
- d — przekątna śladu piramidki diamentowej (w mikronach).

Mikrotwardość (MTw) bywa przeliczana na twardość bezwzględną według wzoru:

$$H_o = \sqrt[3]{MTw},$$

gdzie:

- H<sub>o</sub> — twardość bezwzględna,
- MTw — mikrotwardość.

Twardość jest dla wielu minerałów cechą anizotropową. Dla takich minerałów uzyskiwane wyniki pomiaru mikrotwardości zależą od kierunku przyłożenia piramidki diamentowej. Dlatego dla takich minerałów oblicza się współczynnik anizotropii twardości:

$$K_h = \frac{H_{\max}}{H_{\min}},$$

gdzie:

- K<sub>h</sub> — współczynnik anizotropii twardości,
- H<sub>max</sub> — największa mikrotwardość minerału,
- H<sub>min</sub> — najmniejsza mikrotwardość minerału.

### 18.7.2. Badania z użyciem wiązki światła równoległego

W praktyce mineralogiczno-petrograficznej badania zaczyna się od obserwacji cech optycznych na powierzchni świeżej, która w wyniku badania innych cech fizycznych (np. mikrotwardości) lub chemicznych może zostać naruszona.

Stosując jeden polaroid, można dokonywać obserwacji:

- morfologii ziarn (na podstawie interpretacji przypadkowych przekrojów kryształów),
- łupliwości (na podstawie cech wykruszeń i rys łupliwości),
- barwy (która jest dopełniającą w stosunku do barwy występującej w świetle przechodzącym, np. czerwony cynober jest niebieskawy w świetle odbitym, a zielony malachit jest różowy w świetle odbitym); barwa jest oceniana subiektywnie przez wizualne porównanie z barwą minerału wzorcowego (np. wzorcem barwy białej jest galena i platyna rodzima; żółtej — piryt, chalkopiryt i złoto; różowej — nikielin, bornit, miedź rodzima; czerwonej — melonit; niebieskiej — kowelin); barwa w świetle odbitym jest określana przy filtrowanym świetle niebieskim,
- zdolności refleksyjnej, która wraz z twardością jest najważniejszą cechą diagnostyczną dla minerałów nieprzezroczystych; refleksyjność ocenia się subiektywnie przez wizualne porównanie z refleksyjnością wzorca; ocenę ułatwia zastosowanie okularu komparacyjnego lub fotometrycznego (dokładność oceny: wynik obarczony 5—10% błędem); dużo lepsze wyniki daje ocena fotometrem wykorzystującym światło monochromatyczne o różnych długościach fal (np. 470, 546, 589, 650  $\mu\text{m}$ ; powstający błąd nie przekracza 0,2%),
- dwójodbicia (pleochroizmu refleksyjnego), które ujawnia się podczas rotacji preparatu stolikiem mikroskopu i jest oceniane zwykle wizualnie; ponieważ dwójodbicie powoduje zmianę barwy minerału anizotropowego optycznie, więc bywa nazywane pleochroizmem refleksyjnym (patrz rozdz. 17); zastosowanie imersji (cieczy imersyjnych) pozwala uzyskać korzystniejsze warunki do obserwacji dwójodbicia; wyróżnia się pięć grup minerałów różniących się dwójodbiciem: o bardzo silnym dwójodbiciu (grafit), silnym dwójodbiciu (nikielin), słabym dwójodbiciu (bismut rodzimy, cynober, milleryt, pirotyn), bardzo słabym dwójodbiciu (arsenopiryt, hematyt, kasyteryt), ledwo dostrzegalnym dwójodbiciu (argentyt, wurcyt),
- refleksów wewnętrznych, których występowanie wiąże się z przeświecaniem wynikającym ze słabej zdolności absorpcji światła i niskiej refleksyjności.

Stosując skrzyżowane polaroidy, można dokonywać obserwacji:

- rozróżniania kryształów izo- i anizotropowych; minerały anizotropowe wykazują w świetle odbitym (podobnie jak anizotropowe minerały przezroczyste w świetle przechodzącym) czterokrotne ściemnianie i rozjaśnianie światła spolaryzowanego co 90° przy pełnym obrocie preparatu stolikiem mikroskopu; ściemnienia te mogą być niezupełne; przekroje minerałów jednoosiowych przeciętych płaszczyzną preparatu prostopadle do osi optycznej zachowują się tak, jak przekroje kryształów izotropowych i po-



zostają ciemne podczas rotacji stolikiem mikroskopu o  $360^\circ$ ; zdarzają się także anomalne zjawiska optyczne (np. polaryzacja eliptyczna metali rodzimych); z punktu widzenia anizotropii wyróżnia się minerały nieprzezroczyste o:

- słabym efekcie anizotropii (np. bournonit),
- wyraźnym efekcie anizotropii (np. pirotyn, arsenopiryt),
- silnym efekcie anizotropii (np. grafit, kowelin).

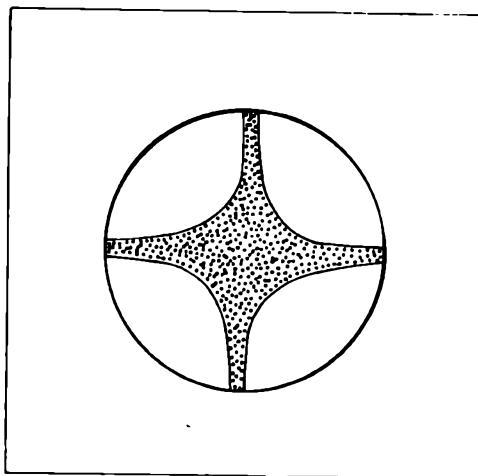
Badanie anizotropii prowadzi się przy:

- wyłączonych filtrach barwnych z układu optycznego mikroskopu kruszcowego,
- zwiększonym natężeniu światła (zwłaszcza dla kryształów o słabym efekcie anizotropii),
- dokładnie skrzyżowanych polaroidach.

Niektóre minerały ujawniają barwny efekt anizotropii. Powstaje on wskutek dyspersji dwójłomności minerału i dla niektórych minerałów stanowi cechę diagnostyczną. Obserwuje się go w położeniu bardzo bliskim pełnego ściemnienia przekroju kryształu.

### 18.7.3. Badania z użyciem wiązki światła zbieżnego

Obrazy minerałów nieprzezroczystych są dość podobne do obrazów interferencyjnych minerałów przezroczystych. Noszą one nazwę figur polaryzacyjnych i występują zarówno u minerałów izo-, jak i anizotropowych (rys. 98).



Rys. 98. Figura polaryzacyjna sfalerytu w świetle odbitym

Powstawanie figur polaryzacyjnych bywa tłumaczone skręceniem płaszczyzny polaryzacji światła odbitego, a nie jego interferencją (Cameron, 1961).

Przekroje minerałów kruszcowych optycznie izotropowych oraz jednoosiowych przeciętych płaszczyzną preparatu prostopadle do osi optycznej dają w odbitym świetle zbieżnym figurę polaryzacyjną w postaci ciemnego krzyża na jasnym tle, którego ramiona są równoległe do nitek krzyża pajęczego i nie zmieniają swego kształtu podczas rotacji preparatu stolikiem mikroskopu (rys. 98). Do rozpadu krzyża dochodzi w przypadku niedokładnego skrzyżowania polaryzatora i analizatora. Przekroje skośne kryształów jednoosiowych podczas pełnego obrotu preparatem dają figurę polaryzacyjną w postaci ciemnego krzyża rozpadającego się czterokrotnie na dwie hiperboliczne izogiry, co  $90^\circ$ . Przekroje kryształów dwuosiowych dają w odbitym świetle zbieżnym również ciemny krzyż, lecz o nierównych ramionach, które po rotacji preparatu stolikiem mikroskopu rozpadają się na dwie hiperboliczne izogiry.

Efekty obserwacji figur polaryzacyjnych ułatwiają niekiedy ocenę stopnia anizotropii minerału lub nawet jego identyfikację, lecz bywają także podważane i kwestionowane jako cecha diagnostyczna minerałów nieprzezroczystych, gdyż sądzi się, że mogą być wytworem odbicia światła od polerowanej powierzchni.

## 18.8. Tok oznaczeń mikroskopowych

Podstawowym celem mineralogiczno-petrograficznych badań mikroskopowych jest identyfikacja obiektu mineralnego. Metody mikroskopowe jednak, w odróżnieniu od wielu innych metod instrumentalnych używanych w rutynowej praktyce mineralogiczno-petrograficznej, pozwalają także:

- ustalać zawartość poszczególnych składników (np. analiza mikrometryczna),
- mierzyć wielkość (np. okular mikrometryczny),
- określać morfologię składników i strukturę skały,
- ustalać sposób rozmieszczenia i stopień wypełnienia przestrzeni przez różne składniki (np. tekstura skały),
- stwierdzać orientację pewnych parametrów optycznych w przestrzeni (np. osi optycznej).

Wyspecjalizowane metody badań mikroskopowych stwarzają możliwość głębokiego i szczegółowego wniknięcia w budowę i zróżnicowanie składu chemicznego kryształów. Badania te są względnie tanie, wydajne, nie niszczące preparatów i dostarczające informacji o pożądanym stopniu szczegółowości.

Wprowadzenie komputerowej obróbki obrazu mikroskopowego (komputerowy analizator obrazu) znacznie przyspieszyło i zwiększyło efektywność analizy mikroskopowej (np. analizy mikrometrycznej, granulometrycznej, morfometrycznej).

W codziennej praktyce mineralogiczno-petrograficznej rzadko bada się kryształy duże, z których można wykonać zorientowane przekroje monokrystaliczne. Większość skał, będących najczęstszym obiektem badań mikroskopowych petrografa czy mineraloga, jest zbudowana z minerałów, których wielkość mieści się w dość wąskim przedziale (od 0,01 mm do 2—3 mm). W badaniach mikroskopowych zatem najczęściej spotyka się preparat (od 0,02 mm do 0,03 mm grubości) zawierający przypadkowo zorientowane przekroje kryształów (minerałów skałotwórczych). Ponieważ różnie zorientowanych przekrojów kryształów mieści się na powierzchni preparatu mikroskopowego (kilka centymetrów kwadratowych powierzchni) bardzo wiele, daje to możliwość wyszukania przekroju pożądanego, przydatnego do zamierzonego typu dokonywanych obserwacji mikroskopowych.

Aby zidentyfikować mikroskopowo nieznaną obiekt mineralny, należy włączyć analizator i dokonać rotacji stolikiem mikroskopu z umieszczonym preparatem mikroskopowym o 360°, obserwując jednocześnie w okularze obiekt, który może:

a) pozostać wygaszony; wtedy może to oznaczać, że jest:

- nieprzezroczysty,
- izotropowy optycznie,
- anizotropowy optycznie, ale wykazuje bardzo niską dwójłomność objawiającą się bardzo niską barwą interferencyjną (szarą lub ciemnoszarą pierwszego rzędu barw interferencyjnych porządku klina kwarcowego),
- optycznie jednoosiowy, ale przecięty prostopadłe do osi optycznej;

b) rozjaśniać i wygaszać światło czterokrotnie, co 90°; może to oznaczać, że jest:

- optycznie dwuosiowy,
- optycznie jednoosiowy, przecięty płaszczyzną preparatu skośnie lub równolegle względem osi optycznej.

Nieprzezroczystość identyfikowanego obiektu da się sprawdzić przez wyłączenie analizatora i ponowną rotację preparatu stolikiem mikroskopu o 360°. Jeżeli obiekt pozostaje podczas rotacji czarny i nie przepuszcza światła, to jest to obiekt nieprzezroczysty (np. minerał kruszcowy, okruch węgla). Taki obiekt powinien być badany mikroskopem kruszcowym po uprzednim wykonaniu preparatu do światła odbitego. Obiekty przezroczyste zarówno izotropowe, jak i anizotropowe po wyłączeniu analizatora dobrze przepuszczają światło, niekiedy o określonej barwie (np. żółtawej, zielonawej, czerwonej, lawendowej), w całym zakresie rotacji preparatu. Istnieje niewielka grupa

obiektów, które określa się mianem przeświecających po brzegach. Przepuszczają one światło w sposób silnie ograniczony, głównie po brzegach, gdzie grubość obiektu jest w preparacie zwykle najmniejsza. Obiekty takie zalicza się zwykle do obiektów nieprzezroczystych.

Izotropowość obiektu można sprawdzić konoskopowo. Kryształ jednoosiowy przecięty płaszczyzną preparatu prostopadle do osi optycznej wykazuje w świetle zbieżnym obraz interferencyjny złożony z krzyża izogir i krzywych izochromatycznych. Kryształ anizotropowy o bardzo niskiej dwójłomności, po wprowadzeniu w bieg strumienia światła gipsówki lub kompensatora ustawionego na tzw. czuły fiolet, wykazuje pewną zmianę barwy interferencyjnej i jest to zmiana tym wyraźniejsza, im większa jest dwójłomność badanego przekroju. Badanie to wykonuje się przy użyciu wiązki światła spolaryzowanego równoległego, z włączonym analizatorem, a obserwacji zmiany barwy interferencyjnej dokonuje się w czasie rotacji preparatu stolikiem mikroskopu.

Izotropowy obiekt może być:

- kryształem należącym do układu regularnego (kontur, ślady płaszczyzn łupliwości),
- kryształem pierwotnie anizotropowym, który uległ wtórnej izotropizacji (np. malakon, czyli zizotropizowany cyrkon),
- ciałem bezpostaciowym (np. żelowym, szklistym).

Obiekty takie bada się głównie z wyłączonym analizatorem. Dla obiektów izotropowych określa się:

- współczynnik załamania światła (w sposób przybliżony: na podstawie reliefu, smugi Beckego, jaszczurowatej powierzchni; bardziej dokładnie: refraktometrycznie, metodą imersyjną),
- barwę i sposób jej rozmieszczenia (np. plamisty, smużysty, równomierny sektorowy, pierścieniowy, strefowy),
- stopień przezroczystości lub zmętnienia,
- ilość i rodzaj wrostków, ich wielkość oraz sposób rozmieszczenia, często dość charakterystyczny (np. siatka sagenitowa),
- stopień automorfizmu i zarys obiektu (np. owalny, nerkowaty, sześcioboczny, czworoboczny),
- ilość systemów śladów płaszczyzn łupliwości, kąty, pod jakimi się przecinają, stopień wyrazistości,
- spękania i ich charakter,
- wielkość obiektu.

Anizotropowy obiekt może być:

- kryształem należącym do jednego z sześciu układów krystalograficznych (z wyjątkiem układu regularnego),
- substancją anizotropową (np. włóknem naturalnym lub syntetycznym, włosem, sierścią, skrobią, celofanem, żywicą, klejem, paznokciem).

Obiekty anizotropowe bada się w świetle spolaryzowanym równoległym (z włączonym i wyłączonym analizatorem) oraz w świetle spolaryzowanym zbieżnym (badania konoskopowe).

W świetle spolaryzowanym równoległym, przy wyłączonym analizatorze, określa się:

- pleochroizm (w tym barwę pleochroiczną związaną z określonym, głównym kierunkiem optycznym w kryształach),
- współczynnik załamania światła (w sposób przybliżony: na podstawie reliefu, smugi Beckego, jaszczurowatej powierzchni; dokładniej: refraktometrycznie, metodą immersyjną),
- ilość i rodzaj wrostków, ich wielkość oraz sposób rozmieszczenia, często charakterystyczny,
- stopień zmętnienia, obecność drobnodispersyjnego pigmentu,
- ilość systemów śladów płaszczyzn łupliwości, kąty, pod jakimi się przecinają, ich wyrazistość i cechy geometryczne (np. ślady ciągłe, ślady przerywane regularnie, ślady przerywane nieregularnie),
- spękania i ich charakter,
- wielkość obiektu,
- stopień automorfizmu i zarys obiektu w różnych przekrojach.

W świetle spolaryzowanym równoległym, przy włączonym analizatorze, określa się:

- rodzaj i kąt wygaszania światła,
- znak optyczny głównego pasa,
- znak optyczny kryształu jednoosiowego przeciętego płaszczyzną preparatu zgodnie z płaszczyzną przekroju głównego,
- wysokość barwy interferencyjnej i związaną z tym dwójłomność przekroju kryształu,
- anormalne barwy interferencyjne,
- zbliżniaczenia, położenie wektorów optycznych względem płaszczyzny zrostu bliźniaczego, płaszczyzn łupliwości i ścian kryształu,
- położenie mniejszego i większego wektora optycznego eliptycznego przekroju indykatrixy względem geometrycznych elementów odniesienia kryształu (np. ścian, śladów płaszczyzn łupliwości, płaszczyzny zrostu bliźniaczego).

W świetle spolaryzowanym zbieżnym określa się:

- przynależność do kryształów jednoosiowych lub dwuosiowych,
- znak optyczny,
- kąt osi optycznych,
- dyspersję dwójłomności i kąta osi optycznych.

Bardzo ważnym elementem analizy mikroskopowej minerałów i skał jest umiejętność wybierania w preparacie mikroskopowym pożądaných, najbardziej przydatnych do zebrania niezbędnych danych optycznych przekrojów kryształów. Do szczególnie użytecznych należą przekroje prostopadłe i równoległe do osi optycznej minerałów jednoosiowych oraz prostopadłe do jednej z osi optycznych i równoległe do płaszczyzny osi optycznych, bądź prostopadłe do pierwszej dwusiecznej minerałów dwuosiowych.

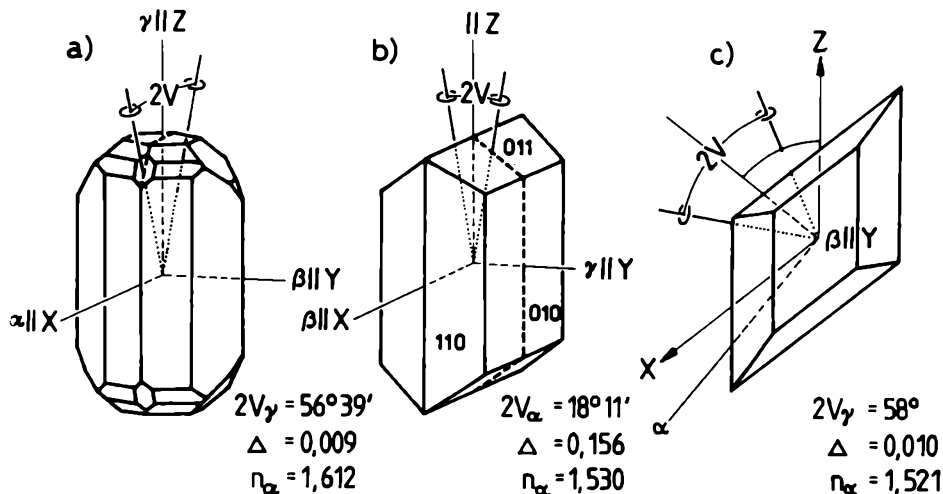
Przekroje prostopadłe lub prawie prostopadłe do osi optycznej kryształu poznaje się z izotropowości lub najniższej możliwej w takim kryształcie barwy interferencyjnej (przekroje o najniższej dwójłomności). Kryształy pleochroiczne mają w tak zorientowanych przekrojach tylko jedną barwę pleochroiczną, odpowiadającą przekrojowi kołowemu indyktrysy o promieniu  $n_{\omega}$  kryształu jednoosiowego lub normalnej optycznej ( $n_{\beta}$ ) kryształu dwuosiowego. Geometrycznie, przekroje prostopadłe do osi optycznej dobrze wykształconych (idiomorficznych) minerałów jednoosiowych mają kontur trójkąta lub sześciokąta (z układu trygonalnego i heksagonalnego) oraz czworokąta lub ośmiokąta (z układu tetragonalnego), a ślady płaszczyzn łupliwości przecinają się pod kątem  $60^{\circ}$  (w kryształach z układu trygonalnego i heksagonalnego) oraz prostym (układ tetragonalny). Przekroje prostopadłe lub prawie prostopadłe do osi optycznej wykorzystuje się do ustalania:

- znaku optycznego minerałów jednoosiowych i dwuosiowych z wykorzystaniem światła spolaryzowanego zbieżnego i płytek pomocniczych,
- dyspersji dwójłomności i kąta osi optycznych minerałów dwuosiowych z wykorzystaniem światła spolaryzowanego zbieżnego,
- kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła kryształów optycznie czynnych.

Przekroje równoległe do osi optycznej lub płaszczyzny osi optycznych wyróżniają się mikroskopowo najwyższą możliwą dla danego minerału barwą interferencyjną, ponieważ dwójłomność ich jest największa. Geometrycznie, automorficzne przekroje kryształów jednoosiowych w położeniu równoległym do osi optycznej są zwykle mniej lub bardziej wydłużone: słupowe, pręcikowe lub igielkowe czy włókniste. Przekroje takie są wykorzystywane zwykle do określania:

- pleochroizmu i schematu barw pleochroicznych (schematu absorpcji),
- dwójłomności minerału,
- wartości współczynników załamania światła,
- znaku optycznego kryształów jednoosiowych,
- znaku optycznego głównego pasa minerałów o wydłużonym pokroju,
- położenia największego i najmniejszego wektora optycznego względem kierunków krystalograficznych, śladów płaszczyzn łupliwości, śladów ścian kryształu, śladów płaszczyzn zbliźniaczeń,
- kąta wygaszania światła.

Dane uzyskiwane z analizy mikroskopowej różnie zorientowanych przekrojów kryształu można syntetyzować graficznie na uproszczonych modelach przestrzennych kryształu (złożonych z głównych dwuscianów) z wykorzystaniem rzutu stereograficznego lub na podstawie głównych przekrojów minerału (rys. 99).



Rys. 99. Graficzna synteza danych optycznych minerałów:

a) topaz, b) aragonit, c) gips

Identyfikacji minerału dokonuje się przez stwierdzenie zgodności zebranych obserwacyjnie danych optycznych z danymi wzorcowymi zawartymi w jednym z podręczników mineralogiczno-petrograficznych (np. A. Bolewski, 1982; M. Borkowska, K. Smulikowski, 1973; P. Ramdohr, 1978; A. Bolewski, A. Manecki, 1993). Najwygodniejsze w użyciu są podręczniki grupujące minerały według cech i kryteriów optycznych (np. dzielące minerały na przezroczyste i nieprzezroczyste, izotropowe i anizotropowe, jednoosiowe i dwuosiowe optycznie, dodatnie i ujemne optycznie). Znacznym ułatwieniem są także tablice i tabele dające przegląd najważniejszych cech optycznych minerałów (np. dwójłomności, wartości współczynników załamania światła, barw pleochroicznych i ich schematu, barw absorpcyjnych). Pozwala to znacznie przyspieszyć oznaczenia mikroskopowe rzadziej spotykanych minerałów, często bez konieczności uciekania się do precyzyjnych oznaczeń ilościowych niektórych parametrów optycznych.

## **Wyspecjalizowane metody badań optycznych kryształów**

Możliwości poznania optycznego kryształów są ciągle jeszcze powiększane. Szczególnie bujny okres rozwoju metod optycznych przypadł na koniec XIX wieku i pierwszą połowę XX wieku. Z tym okresem wiąże się opracowanie przez J. S. Fiodorowa (1853—1919) metody teodolitowej (stolik uniwersalny), skonstruowanie przez Reicherta i Heimstäda (1910) pierwszego mikroskopu fluorescencyjnego, wreszcie opracowanie przez F. Zernikego (1888—1966) podstaw mikroskopii fazowo-kontrastowej (Nagroda Nobla w 1953 roku), której możliwości znacznie poszerzyła jeszcze mikroskopia interferencyjno-polaryzacyjna (A. Lebediew, 1930; F. J. Dyson, C. Sagnac, 1931). W badaniach specjalnych stosuje się także mikroskopię w podczerwieni, mikroskopię rentgenowską, mikroskopię stereoskopową oraz optyczne badania termometryczne i barometryczne na mikroskopowym stoliku grzewczym i dekrepitometrze (metoda dekrepitacji i homogenizacji).

### **19.1. Stolik uniwersalny**

Stolik uniwersalny służy do badań metodami ortoskopowymi i konoskopowymi. Umożliwia także badania właściwości optycznych i morfologicznych całych kryształów o wielkości nie przekraczającej około 1 cm za po-



mocą szklanej kuli Waldmanna ( $\varnothing$  27 mm, wewnątrz pusta). Kulę wypełnia się odpowiednią cieczą imersyjną i wprowadza do niej kryształ przymocowany do oprawki. Kulę montuje się na stoliku uniwersalnym. Pozwala to na obracanie kryształu prawie we wszystkich kierunkach. Kula Waldmanna może być wykorzystywana także do obserwacji optycznych i morfologicznych bez stolika uniwersalnego, wprost pod mikroskopem. Umieszcza się ją wtedy wprost na stoliku mikroskopu za pośrednictwem drewnianego pierścienia, w którym może być obracana w dowolnym kierunku. Taki sposób badania kryształów stosuje się w pracowniach gemologicznych.

Metodą teodolitową można uzyskać:

a) szczegółową charakterystykę własności optycznych minerału, a zwłaszcza odróżnić:

- kryształy izo- i anizotropowe,
- kryształy jednoosiowe od dwuosiowych,
- kryształy dodatnie optycznie od ujemnych optycznie;

można też oznaczyć:

- wartości współczynników załamania światła,
- dwójłomność,
- wartość kąta osi optycznych,
- schemat absorpcji,
- wielkość kąta wygaszania światła w odniesieniu do dowolnych elementów geometrii kryształu,
- wartość kątów pomiędzy różnymi elementami geometrycznymi kryształu (np. między płaszczyznami łupliwości),

b) mikrostrukturalną analizę skały bazującą na ustaleniu optycznej orientacji kryształów w preparatach zorientowanych geograficznie.

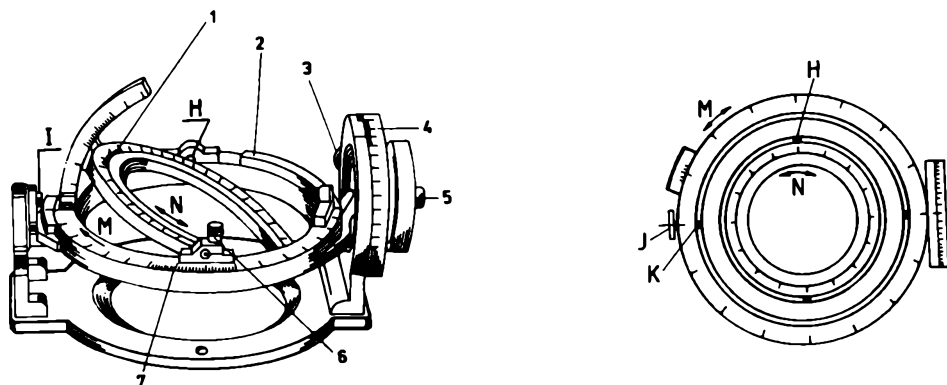
W praktyce mineralogiczno-petrograficznej stolika uniwersalnego używa się najczęściej do identyfikacji:

- skaleni, szczególnie plagioklazów,
- piroksenów,
- amfiboli,
- zbliźniaczeń i praw nimi rządzących,

a także do mikrostrukturalnej analizy skał, szczególnie metamorficznych.

W standardowym mikroskopie polaryzacyjnym preparat mikroskopowy jest rotowany tylko w jednej płaszczyźnie, tj. w płaszczyźnie stolika mikroskopu. Płaszczyzna rotacji mikroskopu polaryzacyjnego pokrywa się z płaszczyzną preparatu mikroskopowego. Ogranicza to znacznie możliwości wykonywania obserwacji cech optycznych kryształów, których bryły geometryczne są przecięte płaszczyzną preparatu przypadkowo, zależnie od orientacji i położenia kryształu w skale. Dla szczegółowej identyfikacji optycznej kryształu

nieodzowna jest znajomość położenia elementów symetrii optycznej względem elementów symetrii geometrycznej kryształu. Uzyskanie tych informacji umożliwia stolik uniwersalny. Za pomocą stolika uniwersalnego preparat mikroskopowy może być dowolnie rotowany w przestrzeni (rys. 100). Stolik uniwersalny jest urządzeniem dodatkowym, sprzęganym z mikroskopem polaryzacyjnym. W użyciu są stoliki cztero- i rzadziej pięcioosiowe (rys. 100). Jednak warunkiem niezbędnym dla pomyślnego przebiegu badań stolikiem uniwersalnym jest bardzo dobra znajomość krystalooptyki i biegłość w posługiwaniu się mikroskopem polaryzacyjnym (zarówno ortoskopem, jak i konoskopem).



Rys. 100. Stolik uniwersalny:

1 — podziałka osi N, 2 — podziałka osi H, 3 — aretaż osi I, 4 — podziałka osi I, 5 — aretaż osi M, 6 — aretaż osi H, 7 — podziałka osi M

Metodzie tej poświęcono dotychczas wiele uwagi. W Polsce ukazało się jednak tylko jedno monograficzne opracowanie poświęcone metodzie stolika uniwersalnego, uwzględniające także możliwości zastosowania go w analizie mikrostrukturalnej (petrostrukturalnej). Jest to monografia W. Heflika i W. Parachoniaka *Stolik uniwersalny* (Warszawa, 1971). Podobnie monograficzny charakter mają prace F. Fediuka *Fjodorovova mikroskopicka metoda* (Praha, 1961) i G. M. Sarancziny *Fedorowskij metod* (Leningrad, 1963). Z uwagi na jasny i wszechstronny opis sposobu posługiwania się stolikiem uniwersalnym, wzbogacony przejrzystymi rysunkami i schematami, skondensowaną treść i atrakcyjny układ, wspomniane monografie są godne polecenia dla szczegółowego zapoznania się z metodą teodolitową.

## 19.2. Mikroskopia fluorescencyjna

Mikroskopowe badanie zjawiska fluorescencji (patrz rozdz. 15) znalazło zastosowanie nie tylko w mineralogii i petrologii, lecz także w innych dyscyplinach geologicznych (np. geologii złóż, gemmologii, paleontologii, geologii poszukiwawczej).

W mikroskopach fluorescencyjnych źródłem energii wzbudzającej jest zwykle wysokociśnieniowa lampa rtęciowa lub lampa łukowa. W standardowych badaniach fluorescencyjnych stosuje się światło wzbudzające o długości fali 405—435  $\mu\text{m}$  (NF — światło niebieskie) lub 365  $\mu\text{m}$  (UF — ultrafiolet) oraz filtry przepuszczające tylko krótkofalową część widma światła białego.

Mikroskopii fluorescencyjnej używa się w badaniach mineralogiczno-petrograficznych do wykrywania w minerałach obecności pierwiastków ziem rzadkich, substancji organicznych (np. śladów węglowodorów, substancji węglistej) oraz w gemmologii do odróżniania naturalnych i sztucznych kamieni szlachetnych.

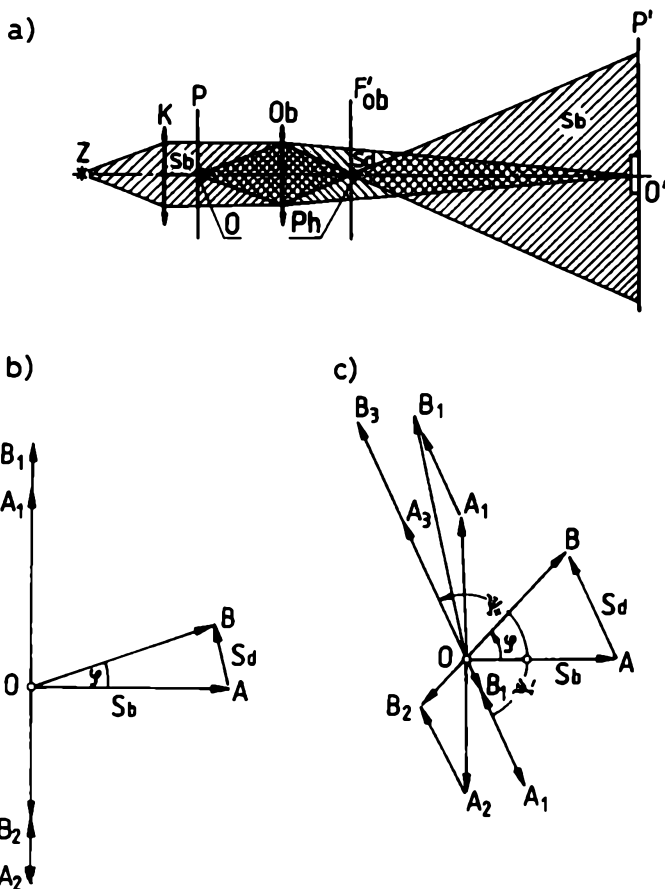
## 19.3. Mikroskopia fazowo-kontrastowa

Obiekty nadające się do badań mikroskopowych można podzielić na:

- amplitudowe, tzn. zmieniające amplitudę drgań światła w sposób różniący się od ich otoczenia (naturalna kontrastowość),
- fazowe, tzn. różniące się od swojego otoczenia współczynnikami załamania światła lub grubością, w różnym stopniu zmieniające fazę drgań światła,
- fazowo-amplitudowe, tzn. łączące w sobie własności obiektów fazowych i amplitudowych.

Oko człowieka jest wrażliwe na zmiany amplitudowe (naturalną kontrastowość). Znacznie trudniej jest wyróżnić obiekty fazowe, szczególnie nieduże i niewiele różniące się od swego otoczenia współczynnikami załamania światła (mikrowrostki, obiekty izotropowe w środowisku izotropowym). Użycie metody kontrastu fazowego pozwala przezwyciężyć te trudności. Metoda kontrastu fazowego polega na przekształceniu niezauważalnej dla oka człowieka modulacji fazowej światła w zauważalną modulację amplitudową (naturalną kontrastowość, rys. 101).

Uzyskanie kontrastu fazowego jest możliwe przez wprowadzenie w bieg promieni światła w mikroskopie polaryzacyjnym odpowiedniej płytki fazowej oraz ściśle z nią sprzężonej przysłony aperturowej kondensora.



Rys. 101. Schemat powstawania kontrastu fazowego (a) oraz wykresy obrazujące interferencję w płaszczyźnie obrazowej mikroskopu (b i c) przy małej i dużej różnicy współczynników załamania światła obiektu fazowego i środowiska go otaczającego:

*Ob* — obiektyw, *P* — płaszczyzna przedmiotowa, *K* — kondensor, *Z* — źródło światła monochromatycznego, *S<sub>b</sub>* — wiązka światła biegnąca bezpośrednio ze źródła światła, *S<sub>d</sub>* — światło dyfrakcyjne, ugięte na przedmiocie, *O'P'* — płaszczyzna obrazowa, *O'* — obraz przedmiotu *O*, *Ph* — płytka fazowa, *F'ob* — płaszczyzna ogniskowa obiektywu

Pierwszy model mikroskopu fazowo-kontrastowego opracował W. Köhler (1941). Dla mikroskopii fazowo-kontrastowej zwykle nie buduje się specjalnych mikroskopów, a tylko do standardowego mikroskopu polaryzacyjnego (petrograficznego) dołącza się wyposażenie dodatkowe, umożliwiające przeprowadzenie badań tą metodą.

Podstawy teoretyczne i zasady konstrukcyjne pierwszego modelu polskiego mikroskopu fazowo-kontrastowego przedstawił M. Pluta w godnej

## 19.4. Inne metody

Wysoko wyspecjalizowane metody badań optycznych minerałów i skał, służące rozwiązywaniu niektórych specyficznych zagadnień mineralogiczno-petrologicznych, mają z natury rzeczy dość ograniczone zastosowanie, często komplementarne w stosunku do powszechnie stosowanych metod mikroskopowych.

Już od dawna zwrócono uwagę na inkluzje gazowo-ciekłe i szkliva w minerałach, o których pierwszych wiadomości dostarczył już H. C. Sorby (1826—1908). Badanie temperatury homogenizacji i dekrepitacji inkluzji umożliwia poznanie chemizmu środowiska, wielkości ciśnienia oraz temperatur panujących w czasie powstawania zawierających je minerałów. Metoda homogenizacji polega na mikroskopowej obserwacji zachowania się inkluzji podczas ogrzewania minerału na stoliku grzewczym. Do tego rodzaju badań najlepiej nadają się minerały przezroczyste, z których wykonuje się preparaty o grubości od 1 mm do 2,5 mm grubości, polerowane obustronnie. Uwięzione w inkluzjach substancje stałe, ciekłe i gazowe ze wzrostem temperatury przechodzą w stan roztworu homogenicznego, którego ciśnienie wzrasta proporcjonalnie do wzrostu temperatury. Po osiągnięciu stanu homogenizacji ciśnienie w inkluzji tak gwałtownie wzrasta, że powoduje jej natychmiastowe rozerwanie. Moment rozerwania zaznacza się słyszalnym trzaskiem. Rejestracja trzasków (zrywów) dokonuje się za pomocą dekrepitometru, a uzyskany zapis (dekrepitogram) określa przyrost lub ubytek zrywów na każde 10°C wzrostu temperatury. Do badania inkluzji metodą dekrepitacji stosuje się próbki o masie od 2 g do 3 g i uziarnieniu od 0,1 mm do 0,3 mm. Interpretacja krzywych dekrepitacji i temperatur homogenizacji budzi jeszcze ciągle pewne kontrowersje.

Istnieje wiele minerałów, które nieprzezroczyste dla światła widzialnego stają się przezroczyste dla długofalowego promieniowania podczerwonego. Jako źródła tego promieniowania w mikroskopach polaryzacyjnych używa się zwykłych żarówek halogenowych zaopatrzonych w odpowiednie filtry przepuszczające tylko promieniowanie podczerwone. Przetwornik elektroniczny daje możliwość bezpośredniej obserwacji obrazu tworzonego przez promieniowanie długofalowe w mikroskopie. Promieniowanie podczerwone szczególnie chętnie bywa stosowane w mikroskopach stereoskopowych.

Mikroskop stereoskopowy jest przyrządem optycznym umożliwiającym widzenie stereoskopowe, czyli odczuwanie głębi w obrazie mikroskopowym. Używa się go do badań w świetle przechodzącym, odbitym i mieszanym. Pozwala uzyskiwać powiększenia badanego obiektu od kilku do kilkudziesięciu razy. W tego rodzaju obserwacjach nie są konieczne specjalnie przygotowywane preparaty, a oglądane stereoskopowo obiekty mogą mieć nawet dość znaczne rozmiary.

Mikroskop interferencyjno-polaryzacyjny wykorzystuje się do określania grubości preparatu, współczynnika załamania światła, dwójłomności, morfologii mikropowierzchni, przepuszczalności światła, uzupełniając tym samym możliwości badawcze mikroskopu polaryzacyjnego i fazowo-kontrastowego, szczególnie w zakresie badań ilościowych. W mikroskopii interferencyjno-polaryzacyjnej wyzyskuje się zjawisko interferencji dwu- lub wielopromieniowej, której zasady przedstawił M. Pluta (1965).

Mikroskopia rentgenowska opiera się na mikroskopowym badaniu obiektów za pomocą promieniowania Roentgena. Umożliwia ona — w porównaniu z mikroskopią w świetle widzialnym — lepszą rozdzielczość obrazu oraz wykorzystuje różną zdolność absorpcyjną promieniowania rentgenowskiego przez poszczególne obiekty. Układ optyczny na potrzeby mikroskopii rentgenowskiej jest bardzo trudny do technicznego wykonania, co znacznie podraża i ogranicza powszechniejsze jej stosowanie.



## Literatura zalecana

- Appel L., Kowalczyk R., 1966. *Mikroskop, budowa i użytkowanie*. Warszawa.
- Bayer H., 1973. *Handbuch der Mikroskopie*. Berlin.
- Bielankin D. S., Pietrow W. P., 1951. *Krystallooptika*. Moskwa.
- Bolewski A., Manecki A., 1993. *Mineralogia szczegółowa*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Bolewski A., Kubisz J., Manecki A., Żabiński W., 1990. *Mineralogia ogólna*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Bolewski A., Żabiński W., 1979. *Metody badań mineralów i skal* (praca zbiorowa). Wyd. Geol., Warszawa.
- Borkowska M., Smulikowski K., 1973. *Minerały skalotwórcze*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Chojnacki J., 1973. *Elementy krystalografii chemicznej i fizycznej*. PWN, Warszawa.
- Czetwierikow S. D., 1955. *Metody badań optycznych mineralów i skal*. Warszawa.
- Fediuk F., 1961. *Fjodorovova mikroskopicka metoda*. Praga.
- Hefig E., 1973. *Zastosowanie i użytkowanie mikroskopu fluorescencyjnego MB 30FL PZO*. Warszawa.
- Heflik W., Parachoniak W., 1971. *Stolik uniwersalny*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Kerr P. F., 1955. *Optical mineralogy*. New York.
- Landsberg G. C., 1976. *Optyka*. Wyd. V. Moskwa.
- Łaszkiewicz A., 1957. *Wykonywanie preparatów mikroskopowych ze skal i kruszców*. Warszawa.
- Łazarenko E. K. 1971. *Kurs mineralogii*. Moskwa.
- Maślankiewicz K., 1984. *Kamienie szlachetne*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Penkala T., 1965. *Optyka kryształów*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Penkala T., 1977. *Zarys krystalografii*. PWN, Warszawa.
- Pluta M., 1965. *Mikroskopia fazowo-kontrastowa i interferencyjna*. Warszawa.
- Płaszyńska M., 1988. *Kamienie szlachetne – nie niszczące metody badania*. PWN, Warszawa—Kraków.
- Ramdohr P., Strunz H., 1978. *Lehrbuch der Mineralogie*. Stuttgart.



Saranczina G. M., 1963. *Fiodorowskij metod*. Moskwa.  
Szaskolskaja M. P., 1976. *Krystalografia*. Moskwa.  
Szczeniowski Sz., 1983. *Fizyka doświadczalna. Optyka*. Warszawa.  
Wahlstrom E. E., 1969. *Optical crystallography*. New York.  
Wołyński L. S., 1958. *Mikroskopowe oznaczenia minerałów kruszczowych*. Warszawa.  
Wood E. A., 1967. *Kryształy i światło*. Poznań.

# Źródła ilustracji

Część zamieszczonych w skrypcie rysunków wzorowano na:

- T. Penkala, *Optyka kryształów*, PWN, Warszawa 1965: rys. 4, 10, 11, 12, 22, 23, 24, 36, 42, 52, 53, 54, 63, 76, 89.
- T. Penkala, *Zarys krystalografii*, PWN, Warszawa 1977: rys. 2, 16, 17, 18, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 51, 58, 59, 60, 61, 64, 67, 75, 86, 90, 91, 92, 96.
- A. Bolewski et al., *Mineralogia ogólna*, Wyd. Geol., Warszawa 1975: rys. 5, 6, 7, 40, 41, 48, 50, 56, 78, 87, 88.
- A. Bolewski et al., *Metody badań minerałów i skał*, Wyd. Geol., Warszawa 1979: rys. 19, 20, 43, 44, 46, 49, 55.A, 97, 98, 100, 101.
- M. Borkowska, K. Smulikowski, *Minerały skalotwórcze*, Wyd. Geol., Warszawa 1973: rys. 26, 28, 38, 65, 71, 72.
- P. Ramdohr, H. Strunz, *Lehrbuch der Mineralogie*, F. Enke Verlag, Stuttgart 1978: rys. 13, 14, 15, 27, 55, 62, 66, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 94, 95.
- Wielka encyklopedia powszechna*. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1968: rys. 1, 3, 8.

**Redaktor  
Grażyna Wojdała**

**Redaktor techniczny  
Alicja Zajączkowska**

**Korektorzy  
Barbara Kuźniarska  
Lukrecja Wawrzyczek**

**Copyright © 1995  
by Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego  
Wszelkie prawa zastrzeżone**

**ISSN 0239-6432**

**Wydawca  
Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego  
ul. Bankowa 12B, 40-007 Katowice**

---

Wydanie I. Nakład: 400 + 50 egz. Ark. wyd. 13,0. Ark. druk. 11,0.  
Przekazano do drukarni we wrześniu 1994 r. Podpisano do  
druku w marcu 1995 r. Papier offset. Kl. III, 70 × 100, 70 g.  
Zam. 413/94 Cena 4 zł 50 gr

---

**Drukarnia Uniwersytetu Śląskiego  
ul. 3 Maja 12, 40-096 Katowice**



Cena 4 zł 50 gr